



**Sofia Verónica Trindade Barbosa**

Mestre em Georrecursos

## **Modelação de atributos hidrogeológicos do maciço envolvente à antiga área mineira da Quinta do Bispo**

Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em  
Engenharia Geológica

Orientador: Doutor José António de Almeida, Professor  
Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Doutor António Alberto Chambel Gonçalves  
Pedro, Professor Auxiliar, Universidade de Évora

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João José Cardoso Pais

Arguente(s): Prof. Doutor António Jorge Gonçalves de Sousa  
Prof. Doutor José Paulo Monteiro

Vogais: Prof. Doutor José António de Almeida  
Prof. Doutor António Alberto Chambel Gonçalves Pedro  
Prof. Doutor Luís Miguel de Amorim Ferreira Fernandes Nunes  
Prof. Doutor Maria Manuela Malhado Simões Ribeiro



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Outubro 2012**







**Sofia Verónica Trindade Barbosa**

Mestre em Georrecursos

## **Modelação de atributos hidrogeológicos do maciço envolvente à antiga área mineira da Quinta do Bispo**

Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em  
Engenharia Geológica



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

### ***Copyright***

*“A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.”*

**Outubro 2012**



*Ao Álvaro*

*À Leonor*

*Aos meus pais*



## Preâmbulo

A modelação geológica e hidrogeológica de maciços fracturados e alterados (Paradela e Zbyszewski, 1971; Chambel, 2006), principalmente se aplicada a áreas restritas, em estudos de maior pormenor, constitui uma linha de investigação emergente no que respeita às abordagens algorítmicas e estabelecimento de metodologias integradas, orientadas pelo caso de estudo.

Proporcionar a recepção de *água* em quantidade e qualidade adequadas pelos diferentes ambientes ecológicos terrestres, assim como, otimizar a sua actual e futura utilização nas devidas condições e em quantidades sustentáveis, constituem acções necessárias fomentar e incrementar. Tais acções repercutem-se no que se considera, presentemente, como um dos principais objectivos em áreas de investigação relacionadas com este recurso: o da simulação da sua existência em diferentes meios, seja a uma escala local, regional ou, inclusivamente, global, e subsequente predição das suas possíveis evoluções de acordo com diferentes cenários previamente estabelecidos.

A concepção, criação e implementação de ferramentas que permitam simular situações reais e prever cenários futuros, em termos quantitativos e qualitativos deste recurso tão valioso é, pois, objectivo que será sempre pretendido pela comunidade científica em geral.

A presente Tese relaciona-se precisamente com tal necessidade, pela sua intenção em tentar estabelecer uma metodologia que seja conducente, como objectivo último, à representação deste recurso num ambiente sub-superficial e subterrâneo, entretanto modificado por uma acção antrópica – uma antiga exploração mineira de urânio.

Construir modelos de escoamento em maciços rochosos alterados e fracturados, à escala local ou regional, com adequado nível de representatividade e, na sequência dos mesmos, estimar produtividades, prever quantidades que venham a estar disponíveis no meio, prever evoluções em profundidade face a alterações verificadas à superfície dos terrenos, inclusivamente as de natureza climática, constituem importantes linhas de investigação no domínio do estudo das *Águas Subterrâneas*, particularmente em *Hidrogeologia* (Custodio e Llamas, 1983a; Custodio e Llamas, 1983b; Lin e Lipták, 2000).

Espera-se, pois, que o conhecimento adquirido e que aqui se apresenta possa ser recebido e divulgado pela comunidade científica em geral, constituindo um contributo para melhorar o nosso conhecimento sobre o modo como se perpetuam os escoamentos neste tipo de meios, onde, por muitas vezes, nos deparamos com situações efectivamente difíceis de prever ou mesmo conhecer e de dominar em pleno.



## **Agradecimentos**

Ao Professor José António de Almeida pela sua orientação excepcional, objectividade, incentivo e motivação que tão bem o caracterizam enquanto pessoa e igualmente na qualidade de docente. O meu total e sincero agradecimento pelo acompanhamento em todas as fases de investigação e de experimentação e pelas orientações das quais em muito dependeu a concretização desta Tese. Agradeço-lhe, incondicionalmente, pelo seu directo, excelente e constante apoio, determinação, motivação e simpatia sempre demonstrados.

Ao Professor António Chambel, pelos seus ensinamentos de qualidade excepcional, orientações científicas, correcções e acompanhamento nas diversas fases deste processo. Igualmente, pela amabilidade e disponibilidade com que sempre me atendeu e recebeu no Departamento de Geociências da Universidade de Évora. O meu sincero agradecimento.

Ao Professor João Pais e ao Professor Delfim de Carvalho pela possibilidade de desenvolvimento das minhas actividades científicas e pedagógicas no Departamento de Ciências da Terra, paralelamente à minha actividade profissional e, igualmente, pela simpatia, consideração e motivação sempre demonstradas.

Ainda ao Professor Delfim de Carvalho o meu agradecimento por todos os seus ensinamentos e orientações, em termos humanos, académicos e profissionais, que se revelaram fundamentais ao meu desenvolvimento enquanto pessoa, enquanto docente e no meu percurso profissional.

Ao Professor Manuel Matos Dias pelos seus ensinamentos e explicações no decorrer dos trabalhos de caracterização geoambiental de antigas minas de urânio, em particular, os respeitantes ao funcionamento, dinâmica e características locais e regionais típicas da área estudada. Igualmente, não posso deixar de expressar o meu agradecimento pela simpatia e respeito com que sempre me tratou.

Ao Doutor Pedro de Carvalho por todos os seus ensinamentos em diversos domínios da Geologia Aplicada e igualmente, e muito em particular, sobre o funcionamento, dinâmica e características hidrogeológicas da área estudada e de outras de enquadramento geológico distinto.

Ao Engenheiro José Baltazar, ao Doutor António Guimas e ao Doutor António Borges Alves de Campos por todos os ensinamentos, explicações, disponibilização de conhecimentos e de informações. Agradeço, igualmente, pela sua prontidão em dar sempre resposta às minhas dúvidas e questões, não podendo, pois, deixar de expressar a minha gratidão.

Ao meu marido, Álvaro Lima, à minha filha, Leonor Lima, e aos meus pais, Albino Barbosa e Regina Barbosa porque sem o seu apoio teria sido totalmente impossível desenvolver os meus trabalhos de investigação. Agradeço pela sua compreensão e motivação, sempre constantes, sempre tão sólidas, em fases, por vezes, tão difíceis e complexas, em resultado da pressão sempre constante a que tenho estado sujeita devida à minha actividade profissional, e, mais recentemente, pelos tempos mais difíceis que se vivem em virtude da actual e complexa e difícil conjuntura social e económica que o nosso País atravessa.

Aos meus irmãos, a Sandra Barbosa e o António Barbosa e ao meu cunhado José Hugo Tomás pelo seu apoio incondicional.

Aos meus colegas de trabalho mais próximos, o Engenheiro José Torrinha, a Doutora Cristina Ribeiro, o Engenheiro José Martins, o Engenheiro Jorge Ribeiro, o Doutor Luís Alves, a Mestre Helena Gomes, a Senhora D. Isabel Vaz e, mais recentemente, o Doutor Paulo Pacheco, pelo interesse, simpatia e motivação e igualmente pela compreensão demonstrada, mesmo nos momentos mais críticos. Ainda, um agradecimento especial ao Engenheiro José Duarte Barros, ao Engenheiro Armando Dinis Correia e ao Engenheiro Pedro Tavares pelos seus conselhos e palavras de motivação e simpatia.

Agradeço, igualmente, à empresa *Midland Valley Exploration, Ltd* pela disponibilização no âmbito de protocolo estabelecido com a FCT-UNL de diversos softwares, neste caso concreto, do *MOVE 2012.1*, ferramenta que se revelou fundamental e que em muito contribuiu para uma melhor apresentação e visualização 3D dos resultados de obtidos.

Por último, não posso deixar de referenciar que a presente actividade de investigação contou com o apoio institucional da EDM, S.A. por via de diferentes representantes de Conselhos de Administração. Neste sentido, gostaria de agradecer, pela motivação e formação profissional e especializada que recebi no passado, enquanto Técnica da EDM, ao Doutor Delfim de Carvalho, ao Engenheiro Rui Motta Guedes e ao Engenheiro Luís Moura e Silva. Agradeço, igualmente, ao Engenheiro Alberto Moreno pelo interesse que, em tempo, demonstrou e pelas suas palavras de motivação e simpatia. Agradeço, igualmente, e muito especialmente, ao Doutor Delfim de Carvalho e ao Engenheiro José Manuel Gaspar Nero e, mais recentemente, ao Doutor Rui da Silva Rodrigues e ao Engenheiro Mário Jorge Ferreira Guedes pela cedência de dispensas em horário de trabalho, sem as quais a concretização desta Tese não teria sido possível. Ainda, ao Engenheiro José Manuel Gaspar Nero relevo, igualmente, o meu agradecimento pela compreensão demonstrada.



## Resumo

O objectivo deste trabalho é apresentar uma metodologia que permita a geração de um modelo 3D de transmissividade em meios rochosos de Granitos Hercínicos e Metasedimentos do Complexo Xisto-Grauváquico, de elevada heterogeneidade, com vários graus de alteração e de fracturação. O caso de estudo é o maciço envolvente à antiga área mineira Quinta do Bispo.

Iniciou-se com a organização e análise da vasta informação disponível sobre o local, nomeadamente revisão da geologia, testemunhos e ensaios de bombagem. Envolveu observação sistemática de fotografias de todos os testemunhos. Foram seleccionados para modelação os atributos Litologia, Alteração, Limonitização e Fracturação e identificadas e compiladas para tabelas as respectivas profundidades, modalidades e intersecções de fractura.

Seguidamente geraram-se modelos 3D destes atributos por simulação geoestatística. Para as variáveis categóricas *Litologias*, *Alteração* e *Limonitização* utilizou-se a SSI; a fracturação foi modelada pela variável *Número de fracturas* por unidade de volume com a SSD com histogramas e médias locais. As variáveis foram simuladas em cadeia, tendo-se condicionado a alteração e a limonitização às litologias e a densidade de fracturação à alteração. Dado que as litologias, alteração e limonitização são não estacionárias, foram geradas regiões para condicionamento adicional.

Seguidamente processaram-se os ensaios de bombagem tendo-se obtido curvas cumulativas de transmissividade por litologia e grau de alteração.

A geração do modelo 3D de transmissividade foi feita a partir do modelo 3D da fracturação por correspondência dos histogramas cumulativos entre os valores simulados da variável *Número de fracturas* e da transmissividade conforme obtidas pelos ensaios de bombagem. Esta correspondência foi feita por litologia e por grau de alteração. A excepção foi o grau de alteração mais elevado onde, por não terem sido simulados o número de fracturas, os valores foram gerados só a partir da curva cumulativa de transmissividade por simulação com campos de probabilidade (*PFS*).

O modelo final de transmissividade é condicional às variáveis intervenientes no modelo de atributos geológicos, porque estas variáveis são simuladas em cadeia, e aos ensaios de bombagem. Integra a variabilidade e heterogeneidade locais destes atributos, os quais condicionam o fluxo tridimensional da água.

**Palavras-chave:** Maciços graníticos fracturados; modelo geológico 3D; modelo de transmissividade em meios fracturados; modelação de fracturas; simulação.



## **Abstract**

The purpose of this work is to present a methodology for the generation of a 3D model of transmissibility in the Hercynian granites and Complex Schist-greywacke metasediment rocks, high heterogeneous and exhibiting several weathering levels and fracturing intensity. The case study is the area surrounding the Quinta do Bispo old mining site.

First, organization and analysis of the extensive information available, including geology review, boreholes cores and pumping tests were carried on. It involves systematic observation of photographs of all cores. Lithology, weathering, limonitization and fractures attributes were selected for modelling purposes. All these information are reported in tables with the respective depths, types and fracture intersections.

Next 3D models of these attributes are generated by geostatistical simulation. For the categorical variables lithologies, weathering and limonitization SIS were used; fracturing was modelled by the variable number of fractures per unit of volume with the DSS conditioned to local histograms and averages. Variables were simulated in a chain, with weathering and limonitization conditioned to lithologies and fracture density conditioned to weathering. Since the lithologies, weathering and limonitization variables are not stationary, regions were generated for additional conditioning.

Thereafter the pumping tests were processed yielding cumulative curves of transmissibility by lithology and weathering levels.

The generation of the 3D model of transmissibility was made from the 3D model of fracturing by correspondence between the cumulative histograms of simulated values of the variable number of fractures and the transmissibility curves obtained by the pumping tests. This correspondence was made by lithology and weathering level. The exception was the higher degree of alteration (W4), where, as the number of fractures is not simulated, it was generated only from the cumulative curve of transmissibility by using the Probability Fields Simulation (PFS).

The final model of transmissibility is conditional to all attributes of the geological model, because these variables are simulated in a chain, and to the pumping tests results. It also integrates the local heterogeneity and variability of these attributes, which determine the three-dimensional flow of water.

**Keywords:** Fractured granitic rocks; 3D geological model; model of transmissibility in fractured media; modelling of fractures; simulation.



## Índice de matérias

<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Enquadramento Geológico .....</b>	<b>5</b>
<b>3. Organização e Análise da Informação Disponível .....</b>	<b>21</b>
<b>4. Metodologia e Fundamentos Teóricos Geoestatísticos .....</b>	<b>29</b>
4.1 Estado da Arte .....	29
4.2 Apresentação da Metodologia .....	31
4.3 Conceitos gerais de Geoestatística .....	39
4.4 Estratégia e Algoritmos de Simulação Geoestatística Utilizados.....	42
4.4.1 Simulação sequencial da indicatriz .....	43
4.4.2 Extensão da SSI para conjuntos multifásicos com correcção das probabilidades locais .....	45
4.4.3 Simulação sequencial directa .....	48
4.4.4 Simulação de campos de probabilidade .....	50
4.5 Simulador de Fracturas por Objectos FTRIAN .....	51
<b>5. Caso de Estudo Parte I: Modelação 3D das Litologias, Alteração, Limonitização e Fracturação.....</b>	<b>53</b>
5.1 Modelo 3D das Litologias .....	53
5.1.1 Análise de modelos litológicos interpretativos .....	53
5.1.2 Selecção do modelo litológico interpretativo e ajustamentos .....	60
5.1.3 Estrutura e continuidade espacial dos dados experimentais.....	66
5.1.4 Simulação 3D das litologias .....	68
5.2 Modelo 3D da Alteração.....	78
5.2.1 Tratamento e análise estatística dos dados de partida .....	78

5.2.2	Simulação geoestatística da alteração .....	82
5.3	Modelo 3D da Limonitização .....	91
5.3.1	Tratamento e análise estatística dos dados de partida .....	91
5.3.2	Simulação geoestatística da variável limonitização .....	94
5.4	Modelo 3D da Fracturação .....	98
5.4.1	Levantamentos de detalhe .....	98
5.4.2	Conversão 1D para 3D da densidade de fracturação.....	106
5.4.3	Simulação 3D da densidade de fracturação.....	112
<b>6.</b>	<b>Caso de Estudo Parte II: Modelação dos Atributos Hidrogeológicos.</b>	<b>117</b>
6.1	Análise e Interpretação de Ensaios de Bombagem.....	117
6.1.1	Enquadramento e considerações prévias sobre a metodologia de análise e interpretação adoptada.....	117
6.1.2	Características gerais dos ensaios realizados .....	122
6.1.3	Discussão dos resultados seleccionados.....	127
6.1.3.1	Características do maciço nas áreas de PP5B E PP6B e influências no respectivo comportamento hidráulico.....	127
6.1.3.2	Características do maciço na área noroeste e influências no respectivo comportamento hidráulico (furos PP5B, PP1B, F2B E PP5A) .....	134
6.1.3.3	Características do maciço na área este e influências no respectivo comportamento hidráulico (análise dos furos PP6B E PP6A) .....	138
6.1.3.4	Resultados do ensaio no Poço P1 (Ensaio 4).....	140
6.1.4	Conclusões e síntese dos melhores resultados .....	145
6.2	Simulação de Modelos 3D da Transmissividade.....	151
<b>7.</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>161</b>
<b>8.</b>	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>165</b>

## Índice de figuras

Figura 1.1. Localização da área de estudo na região centro de Portugal.....	2
Figura 2.1. Litologias e principais estruturas da região uranífera da Cunha Baixa e Quinta do Bispo (adaptado de Matos-Dias e Costa, 1972).....	5
Figura 2.2. Litologias, estruturas e sondagens executadas na área mineira da Quinta do Bispo em diversas campanhas ( <i>fonte: EXMIN, EDM</i> ) .....	6
Figura 2.3. Testemunhos de sondagem do furo S2B – 25,30 a 28,00 metros de profundidade. Granito de duas micas de grão grosseiro, porfiróide com acentuados efeitos de sericitização. ....	7
Figura 2.4. Testemunhos de sondagem do furo PP5B – 41,90 a 46,40 metros de profundidade. Granito de duas micas de grão grosseiro, porfiróide com acentuados efeitos de sericitização e caulinização. ....	7
Figura 2.5. Testemunhos de sondagem do furo PP3B – 39,30 a 44,30 metros de profundidade. Granito de grão médio com predominância de biotite, evidenciando efeitos ligeiros de cloritização. A textura porfiróide é devida aos fenocristais tabulares de feldspato. ....	8
Figura 2.6. Testemunhos de sondagem do furo S4B – 54,45 a 56,00 metros de profundidade. Granito de grão médio com predominância de biotite, evidenciando efeitos ligeiros de cloritização. ....	8
Figura 2.7. Corta mineira resultante da exploração de xenólito composto por metassedimentos do complexo xisto-grauváquico, com mineralizações do tipo “stockwork” e tipo disseminado ( <i>fonte:</i> <i>Arquivos fotográficos da EDM, S.A.</i> ).....	10
Figura 2.8. Testemunhos de sondagem do furo PP4B – 52,00 e 56,40 metros de profundidade. Exemplo de granito breechificado, bastante hematitizado e limonitizado. A esta profundidade os logs radiométricos efectuados acusam elevados teores em urânio, entre 90 a 150 c.p.s. (GMT-3T). .....	10
Figura 2.9. Testemunhos de sondagem do furo PP1B – 74,80 e 80 metros de profundidade. ....	11
Figura 2.10. Furo PP1B – 63,00 e 70,10 metros (à esquerda) e Furo PP5B – 5,00 e 10,45 metros (à direita). Granitos de duas micas, de grão grosseiro, porfiróides, intersectados por intercalações de natureza pegmatítica. Nestes granitos, em particular nas proximidades de uma importante falha com direcção N70W que intersecta a corta são bastante acentuados os efeitos de sericitização e argilização dos granitos. ....	11
Figura 2.11. Furo PP4B – 56,40 a 61,00 metros de profundidade (em cima) e Furo PP3B – 53,00 a 57,00 metros de profundidade (em baixo). Granito de grão médio, de duas micas,	

predominantemente biotítico e que no seio e junto a estruturas brechificadas apresenta pronunciados efeitos de hematitização e cloritização. Nestes furos, nas proximidades destas estruturas, também se identificam efeitos de sericitização e argilização.....	13
Figura 2.12. Pseudo-secção F8B-PP6A-PP6B-F12B-F11B-PP2A-PP2B-F13B com indicação de principais zonas de falha, filões de quartzo intersectados e locais que indicaram surgência de água. Correspondência com a cartografia de fracturas do local e perfis de condutividade e resistividade (adaptações sem escala; fonte dos perfis: Carvalho <i>et al.</i> , 2005).....	14
Figura 2.13. Furos F1B, F2B, F3B, F4B, PP1B, PP1A, PP5B, PP5A, PP3A, PP3B e PP4B com indicação de principais zonas de falha, filões de quartzo intersectados, locais que indicaram surgência de água e zonas com granito brechificado. Correspondência com a cartografia de fracturas do local e perfis de condutividade e resistividade (adaptações sem escala; fonte dos perfis: Carvalho <i>et al.</i> , 2005).....	16
Figura 2.14. Possível interpretação relativa à localização e representação espacial da estrutura principal que intersecta a área (adaptações sem escala; fonte dos perfis: Carvalho <i>et al.</i> , 2005). 17	
Figura 2.15. Hasteal NE da corta mineira. Notar a zona esverdeada no talude NE, eventualmente coincide com fractura vertical NS (Fonte: EDM, EXMIN). ....	19
Figura 3.1. Testemunhos de sondagem do furo PP4B - 13,80 a 18,40 metros de profundidade.....	23
Figura 3.2. Exemplificação de interpretação conjunta realizada com recurso a resultados da campanha electromagnética (Unidades mS/m) e aos levantamentos cartográficos de falhas observadas em zonas do maciço aflorante ou exposto em taludes da corta mineira.....	26
Figura 3.3. Representação 3D da área seleccionada para estudo com indicação da localização das sondagens disponíveis e seu posicionamento relativamente à corta mineira e da localização dos dois perfis em YZ e do nível em XY considerados para representação visual dos resultados de simulação obtidos das variáveis estudadas nos Capítulos 5 e 6 (visualização a partir do MOVE® 2012.1).....	27
Figura 4.1. Diagrama funcional das três fases principais da metodologia proposta para este estudo no que respeita à modelação e interacção com a informação de partida. ....	31
Figura 4.2. Fluxograma da fase I da metodologia proposta para a geração do modelo geológico 3D dos atributos litologia, alteração e limonitização.....	33
Figura 4.3. Fluxograma da fase II da metodologia proposta para a geração do modelo geológico 3D da densidade de fracturação. ....	35
Figura 4.4. Fluxograma da fase 4 para a geração do modelo 3D de transmissividades. ....	37



Figura 4.5. Procedimento experimental para correspondência de histogramas destinado a converter as imagens de número de fracturas em imagens de transmissividade equivalente.....	38
Figura 4.6. Modelo de abordagem inversa para o estabelecimento da relação entre N, P32 e DLF.....	51
Figura 5.1. Sectores NW e Central. Visualização da matriz de dados de partida respeitantes aos Modelos 4 e 8 da Litologia, sem tratamento geoestatístico prévio. ....	56
Figura 5.2 Sondagem S2B – 28,00 a 30,75 metros de profundidade. Contacto entre granito de duas micas porfiróide intensamente alterado com os micaxistos de embebição. ....	58
Figura 5.3. Sondagem S4B – 46,40 a 49,05 metros de profundidade. Efeitos de migmatização em granito de natureza predominantemente biotítica e de granularidade média. ....	58
Figura 5.4. Sector Sul. Visualização da matriz de dados de partida respeitantes aos Modelos 4 e 8 da Litologia, sem tratamento geoestatístico prévio.....	59
Figura 5.5. Sector Este. Visualização da matriz de dados de partida respeitantes aos Modelos 4 e 8 da Litologia, sem tratamento geoestatístico prévio.....	60
Figura 5.6. Localização das Pseudo-secções AA' e EE' consideradas para ilustrar algumas das principais diferenças possíveis atribuir aos dados de partida da Litologia.....	61
Figura 5.7. Pseudo-secções AA' de diferentes modelos litológicos interpretativos (ilustração esquemática dos dados de partida, sem processamento geoestatístico). ....	62
Figura 5.8. Pseudo-secções EE' de diferentes modelos litológicos interpretativos (ilustração esquemática dos dados de partida, sem processamento geoestatístico). ....	63
Figura 5.9. Variogramas experimentais da litologia Granito Porfiróide e modelo teórico ajustado. ....	66
Figura 5.10. Variogramas experimentais da litologia Granito Biotítico e modelo teórico ajustado. ....	67
Figura 5.11. Variogramas experimentais da litologia Micaxisto e modelo teórico ajustado. ....	67
Figura 5.12. Variogramas experimentais da litologia Migmatito e modelo teórico ajustado.....	67
Figura 5.13. Variogramas experimentais da litologia Granito Brechificado e modelo teórico ajustado. ....	67
Figura 5.14. Variogramas experimentais da fase Pegmatito e modelo teórico ajustado. ....	68
Figura 5.15. Visualização 3D das regiões estabelecidas para as fases Granito Porfiróide e Granito Biotítico com base na cartografia litológica à escala 1:5.000, consideradas para posterior condicionamento dos resultados de simulação (MOVE® 2012.1). ....	68

Figura 5.16. Duas imagens simuladas equiprováveis das litologias e imagem média das 20 realizações: (1) Granito porfiróide; (2) Granito biotítico (3) Micaxistos; (4) Migmatitos (5) Granito brechificado (6) Pegmatito. (Plano XY, Z=387,5m).....	70
Figura 5.17. Zonamento binário, duas imagens simuladas equiprováveis e imagem média das 20 realizações das litologias: (1) Granito porfiróide; (2) Granito biotítico (3) Micaxistos; (4) Migmatitos (5) Granito brechificado (6) Pegmatito. (Plano YZ, X=230300m).....	71
Figura 5.18. Zonamento binário, duas imagens simuladas equiprováveis e imagem média das 20 realizações das litologias: (1) Granito porfiróide; (2) Granito biotítico (3) Micaxistos; (4) Migmatitos (5) Granito brechificado (6) Pegmatito. (Plano YZ, X=230550m).....	72
Figura 5.19. Variogramas da litologia Granito Porfiróide de uma imagem obtida por SSI com correcção de probabilidades locais. ....	74
Figura 5.20. Variogramas da litologia Granito Biotítico de uma imagem obtida por SSI com correcção de probabilidades locais. ....	74
Figura 5.21. Variogramas da litologia Micaxisto de uma imagem obtida por SSI com correcção de probabilidades locais. ....	75
Figura 5.22. Variogramas da litologia Migmatito de uma imagem obtida por SSI com correcção de probabilidades locais. ....	75
Figura 5.23. Variogramas da litologia Granito brechificado de uma imagem obtida por SSI com correcção de probabilidades locais.....	76
Figura 5.24. Variogramas da litologia Pegmatito de uma imagem obtida por SSI com correcção de probabilidades locais. ....	76
Figura 5.25. Em cima: visualização 3D do cenário médio das fácies Granito Porfiróide (1) e Granito Biotítico (2); em baixo: visualização 3D do cenário médio das fácies Micaxisto (3), Migmatito (4) Granito Brechificado (5) e Pegmatito (6) (MOVE® 2012.1).....	77
Figura 5.26. Exemplo de dois perfis de condutividades obtidas por modelação geoelectrica 2D com o recurso ao <i>software</i> EM34-2D na envolvente à corta mineira. Unidades mS/m (fonte: Carvalho <i>et al.</i> , 2005). ....	79
Figura 5.27. Exemplos de níveis de “fracturação fina” em testemunhos do furo PP5B colhidos entre os 41,90 a 46,40 metros de profundidade. ....	81
Figura 5.28. Exemplo de níveis de “fracturação fina” em testemunhos do furo PP3B colhidos entre os 65,60 a 69,65 metros de profundidade. ....	81

Figura 5.29. Visualização 3D das regiões definidas em função da profundidade dos 15 metros (MOVE® 2012.1). .....	83
Figura 5.30 Variogramas experimentais omnidireccionais em XY das variáveis W2, W3 e W4.....	83
Figura 5.31. Variograma experimental omnidireccional multifásico da variável Alteração com ajustamento a um modelo teórico exponencial. ....	84
Figura 5.32. Imagens simuladas de Litologias (em cima), de Alteração (duas imagens ao centro) e imagem média das 100 simulações de alteração (em baixo): (1) Maciço inalterado, rocha sã (2) Maciço pouco alterado (3) Maciço alterado (4) Maciço muito alterado, decomposto (Plano XY, Z=387,5m). Comparação de resultados com uma imagem simulada das litologias em que: (1) Granito Porfíróide (2) Granito Biotítico (3) Micaxistos (4) Migmatitos (5) Granito Brechificado (6) Pegmatito. ....	85
Figura 5.33. Zonamento binário de 15 metros, imagens simuladas de Litologias (1) e Alteração (2) e imagem média das 100 simulações de alteração (em baixo): (1) Maciço inalterado, rocha sã (2) Maciço pouco alterado (3) Maciço alterado (4) Maciço muito alterado, decomposto. Comparação de resultados com uma imagem simulada das litologias em que: (1) Granito Porfíróide; (2) Granito Biotítico (3) Micaxistos; (4) Migmatitos (5) Granito Brechificado (6) Pegmatito (Plano YZ, X=230300m). ....	86
Figura 5.34. Zonamento binário de 15 metros, imagens simuladas de Litologias e de Alteração (2) e imagem média das 100 simulações de alteração (em baixo): (1) Maciço inalterado, rocha sã (2) Maciço pouco alterado (3) Maciço alterado (4) Maciço muito alterado, decomposto. Comparação de resultados com uma imagem simulada das litologias em que: (1) Granito Porfíróide; (2) Granito Biotítico (3) Micaxistos; (4) Migmatitos (5) Granito Brechificado (6) Pegmatito (Plano YZ, X=230550m). ....	87
Figura 5.35. Variograma omnidireccional multifásico da Alteração de uma imagem obtida por SSI com correcção de probabilidades locais. ....	88
Figura 5.36. Visualização 3D da imagem média de alteração. Em cima (1) Maciço inalterado, rocha sã e (2) Maciço pouco alterado (3); em baixo: fases Maciço alterado (4) e Maciço muito alterado (MOVE® 2012.1). ....	90
Figura 5.37. Furo PP4B – 52,00 a 56,40 metros de profundidade. Efeitos de oxidação do maciço (limonitização), por circulação de fluidos aquosos em área hematitizada e brechificadas. ....	91
Figura 5.38. Reclassificação das classes respeitantes ap atributo limonitização.....	92
Figura 5.39 Variogramas multifásico da variável Limonitização e modelo teórico ajustado: esq) omnidireccional horizontal; dir) vertical. ....	94

Figura 5.40. Imagem simulada de alteração (em cima), duas imagens simuladas de limonitização (ao centro) e imagem média de limonitização (em baixo): (1) Fracturas e/ou matriz com poucos ou nenhuns efeitos de circulação de águas; (2) Fracturas e/ou matriz com efeitos de circulação de águas (Plano XY, Z=387,5m). Comparação de resultados com uma imagem simulada da alteração em que (1) Maciço inalterado, rocha sã (2) Maciço pouco alterado (3) Maciço alterado e (4) Maciço muito alterado, decomposto. ....	95
Figura 5.41. Zonamento binário de 15m, imagem simulada de alteração, duas imagens simuladas de limonitização e imagem média de limonitização: 1) Fracturas e/ou matriz com poucos ou nenhuns efeitos de circulação de águas; (2) Fracturas e/ou matriz com efeitos de circulação de águas (Plano YZ, X=230300m). Comparação de resultados com uma imagem simulada da alteração em que (1) Maciço inalterado, rocha sã (2) Maciço pouco alterado (3) Maciço alterado e (4) Maciço muito alterado, decomposto. ....	96
Figura 5.42. Zonamento binário de 15m, imagem simulada de alteração, duas imagens simuladas de limonitização e imagem média de limonitização: 1) Fracturas e/ou matriz com poucos ou nenhuns efeitos de circulação de águas; (2) Fracturas e/ou matriz com efeitos de circulação de águas (Plano YZ, X=230500m). Comparação de resultados com uma imagem simulada da alteração em que (1) Maciço inalterado, rocha sã (2) Maciço pouco alterado (3) Maciço alterado e (4) Maciço muito alterado, decomposto. ....	97
Figura 5.43. Exemplo de fracturas identificadas e categorizadas em logs de furos de sondagens (exemplos de troços respeitantes aos furos PP6B – à esquerda - e PP1B – à direita). ....	98
Figura 5.44. Distribuição aproximada dos comprimentos e frequências do comprimento das falhas sub-verticais que foram possíveis reconhecer e individualizar, sem consideração dos níveis de “fracturação fina” (valores em metros). ....	100
Figura 5.45. Frequências específicas de cada classe de acordo com a existência ou não de óxidos com contabilização de níveis de “fracturação fina” – à esquerda – e sem contabilização de níveis de “fracturação fina” – à direita (“H+O” – fracturação fina”; “H” – fracturação sub-hrizontal; “V – Fracturação sub-vertical”; “O – fracturação oblíqua”). ....	101
Figura 5.46. Frequências relativas, por intervalos de profundidade, das fracturas com óxidos (indicadas a cor vermelha e laranja) e sem óxidos (indicadas em tons de azul) detectadas em testemunhos de sondagem dos furos PP5B, PP3B e PP6B. ....	102
Figura 5.47. Frequências relativas, por intervalos de profundidade, das fracturas com óxidos (indicadas a cor vermelha e laranja) e sem óxidos (indicadas em tons de azul) detectadas em testemunhos de sondagem dos furos S4A, S4B e PP2B. ....	103

Figura 5.48. Frequências das famílias de inclinação por tipos litológicos (“H+O” – fracturação fina; “H” – fracturação sub-horizantal; “V” – Fracturação sub-vertical; “O” – fracturação oblíqua; “PEG” – Pegmatito; “GP” – Granito Porfíróide; “GB” – Granito Biotítico; “GM” – Migmatito; “MX” – Micaxisto; “BRECH” – Granito Brechificado). .....	104
Figura 5.49. Frequências relativas, por níveis de profundidade, das fracturas sem preenchimento ( indicadas a cor azul) e com preenchimentos (indicadas a cor roxa e lilás) detectadas em testemunhos de sondagem dos furos PP1B, PP4B e PP6B. ....	106
Figura 5.50. Histogramas cumulativos da Densidade Linear de Fracturação (DLF) em função das litologias predominantes (Granito Porfíróide e Granito Biotítico), graus de alteração, efeitos de limonitização e profundidade definida em função do nível dos 15 metros. ....	107
Figura 5.51. Lei de potência $aL^e$ (em que $a=1$ , $e=-2$ ), com L a variar de 10 cm (medida mínima das observações) a 5 metros. ....	108
Figura 5.52. Tabela e gráfico que reportam a correspondência entre os valores da DLF 1D (5m) em Número de fracturas 3D num bloco com $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$ . ....	109
Figura 5.53. Visualização de resultados da simulação de 1000, 6000, 12000, 18000, 24000 e 29000 fracturas num cubo de dimensão $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$ (MOVE® 2012.1). ....	110
Figura 5.54. Histogramas da DLF 1D e do Número de Fracturas a 3D condicionado às alterações W1, W2 e W3.....	111
Figura 5.55. Ajustamento do variograma experimental da direcção vertical para a densidade de fracturação a um modelo exponencial, isotrópico, de amplitude 20 metros. ....	112
Figura 5.56. À direita: imagens simuladas do Número de Fracturas 3D em células unitárias de $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$ (Plano XY, Z=387,5m). À esquerda: imagens simuladas homólogas da alteração onde (1) Maciço inalterado, rocha sã (2) Maciço pouco alterado (3) Maciço alterado e (4) Maciço muito alterado, decomposto.....	113
Figura 5.57. Comparação entre imagem simulada do grau de alteração e correspondente imagem simulada do Número de Fracturas 3D em células unitárias de $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$ (Plano YZ, X=230300m). (1) Maciço inalterado, rocha sã (2) Maciço pouco alterado (3) Maciço alterado e (4) Maciço muito alterado, decomposto; NF – Número de Fracturas 3D.....	114
Figura 5.58. Comparação entre imagem simulada do grau de alteração e correspondente imagem simulada do Número de Fracturas 3D em células unitárias de $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$ (Plano YZ, X=230500m). (1) Maciço inalterado, rocha sã (2) Maciço pouco alterado (3) Maciço alterado e (4) Maciço muito alterado, decomposto; NF – Número de Fracturas 3D.....	114

Figura 5.59. Variogramas do Número de Fracturas 3D (em células unitárias de $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$ ) de uma imagem simulada obtida por SSD. ....	115
Figura 5.60. Comparação entre os histogramas da DLF a 1D e um das 300 imagens equiprováveis simulações do Número de Fracturas 3D geradas por SSD. ....	116
Figura 6.1. Exemplificação de ensaio com heterogeneidades realizado no furo de PP5B; intervalo de bombagem dos 0 até aos 100 minutos. Ajustamento à curva do modelo de “Theis com correcção de Jacob”. ....	118
Figura 6.2. Condições gerais e faseamentos do ensaio de bombagem em PP6B. ....	119
Figura 6.3. Interpretação dos rebaixamentos registados entre os 219 e os 314 minutos de bombagem no furo PP5B pelo método de dupla porosidade (provável “Estádio Final”, situação de equilíbrio); $T(\text{m}^2/\text{dia}) = 1,85 \times 10^{-2}$ ; $S = 1,22 \times 10^{-6}$ ; $\sigma = 2,09 \times 10^1$ ; $\lambda = 1,00 \times 10^1$ .....	121
Figura 6.4. Interpretação dos rebaixamentos registados entre os 391 e os 611 minutos de bombagem nos furos PP6B e PP6A pelo método de dupla porosidade (provável “Estádio Final”, situação de equilíbrio), incluindo período de recuperação; Furo PP6B: $T(\text{m}^2/\text{dia}) = 1,05 \times 10^0$ ; $S = 1,84 \times 10^{-5}$ ; Furo PP6A: $T(\text{m}^2/\text{dia}) = 3,56 \times 10^0$ ; $S = 8,39 \times 10^{-3}$ .....	122
Figura 6.5. Enquadramento litológico-estrutural dos furos da campanha de 2007: PP5A, PP5B, PP6A e PP6B.....	123
Figura 6.6. Condições gerais e faseamentos do ensaio com bombagem em PP5B e evolução dos rebaixamentos nos furos PP5B, PP5A, F2B e PP1B.....	124
Figura 6.7. Condições gerais e faseamentos do ensaio com bombagem em PP6B e evolução dos rebaixamentos nos furos PP6B e PP6A.....	124
Figura 6.8. Enquadramento litológico-estrutural dos furos usados para bombagem e de observação de níveis da campanha de 2008.....	126
Figura 6.9. Rebaixamentos em Furos e Piezómetros na envolvente à corta - F2B, F3B, F4B, F5B, PP5B, PP5A, PP3B e PP3A. ....	127
Figura 6.10. Rebaixamentos no Poço P1 e em Furos localizados no interior da corta e que intersectam o maciço rochoso subjacente (S2A, S2B, S4A, S4B). ....	127
Figura 6.11 Níveis de alteração do maciço rochoso dos furos PP5B e PP6B. ....	128
Figura 6.12. Valores de Transmissividade ( $\text{m}^2/\text{dia}$ ) do furo PP5B obtidos nas diversas fases do ensaio de bombagem e por interpretação com recurso a diferentes métodos de análise. ....	129
Figura 6.13. Valores de transmissividade ( $\text{m}^2/\text{dia}$ ) dos furos PP5B e PP6B obtidos nas diversas fases dos ensaios de bombagem e por interpretação com recurso a diferentes métodos de análise	

(abscissas – resultados obtidos pelo “Método de Theis com Correção de Jacob”; ordenadas – valores obtidos pelo “Método de Porosidade Dupla”).	130
Figura 6.14. Densidade linear da fracturação (DLF) nos furos PP5B e PP6B e evolução em profundidade dos graus de preenchimento das fracturas.	130
Figura 6.15. Valores de transmissividade ( $m^2/dia$ ) do furo PP6B obtidos nas diversas fases do ensaio de bombagem e por interpretação com recurso a diferentes métodos de análise.	131
Figura 6.16. Efeitos de oxidação em profundidade nos maciços e nas superfícies das fracturas intersectadas pelos furos PP5B e PP6B.	132
Figura 6.17. Valores do Coeficiente de Armazenamento dos furos PP5B e PP6B, obtidos nas diversas fases do ensaio de bombagem e por interpretação com recurso a diferentes métodos de análise (abscissas – resultados obtidos pelo “Método de Theis com Correção de Jacob”; ordenadas – valores obtidos pelo “Método de Porosidade Dupla”).	133
Figura 6.18. Níveis de maior alteração do maciço rochoso na área dos furos PP5B, PP1B, PP5A E F2B.	134
Figura 6.19. Grau de preenchimento das fracturas dos furos PP1B e PP5B no maciço rochoso menos alterado e em profundidade (valores em percentagem).	135
Figura 6.20. Presença de óxidos nas superfícies das fracturas dos furos PP1B e PP5B (valores em percentagem).	136
Figura 6.21. Resultados de transmissividade (em $m^2/dia$ ) do ensaio de bombagem realizado em PP5B.	136
Figura 6.22. Zonas de contacto entre o granito mais alterado e mais são e zonas de falha, identificadas em profundidade durante os trabalhos de furação nos furos PP5A, PP5B e F2B, e que poderão explicar as maiores transmissividades verificadas entre PP5B e PP5A e F2B.	137
Figura 6.23. Projecção dos valores de transmissividade ( $m^2/dia$ ) obtidos segundo o método “Theis com Correção de Jacob” e de “Dupla porosidade” para o maciço na zona do furo PP5B e para o maciço que se situa entre os furos PP5B-PP1B, PP5B-PP5A e PP5B-F2B.	138
Figura 6.24. Projecção dos valores de transmissividade ( $m^2/dia$ ) obtidos segundo o método “Theis com Correção de Jacob” e de “Dupla porosidade” para o maciço na zona dos furos PP5B e PP6B e do maciço que se situa entre os furos PP5B-PP1B, PP5B-PP5A, PP5B-F2B e PP6B-PP6A.	139
Figura 6.25. Comparação do grau de alteração entre os furos PP5B, PP1B, PP5A, F2B, PP6B e PP6A. Evolução do grau de alteração em.	140

Figura 6.26. Ensaio 4 – Localização do Poço de bombagem “P1” e dos Poços e Furos com resultados passíveis de interpretação. ....	141
Figura 6.27. Correlação dos valores de transmissividade ( $m^2/dia$ ) obtidos pelos Métodos de “Theis com Correção de Jacob” e de “Dupla Porosidade” para a totalidade dos ensaios. ....	142
Figura 6.28. Correlação dos valores de transmissividade ( $m^2/dia$ ) obtidos pelos Métodos de “Theis com Correção de Jacob” e de “Dupla Porosidade” para a totalidade dos ensaios. Escalas logarítmicas e distinção entre ensaios. ....	143
Figura 6.29. Níveis do maciço muito alterado (w4) em profundidade dos furos PP5B, PP1B, F2B e PP5A, com destaque das áreas dos furos que apresentam tubo aberto e, portanto, ensaiadas no decorrer da bombagem. ....	146
Figura 6.30. Frequências acumuladas dos resultados de transmissividade seleccionados e possíveis interpretações para o caso do ensaio de bombagem realizado no furo PP5B. ....	147
Figura 6.31. Frequências acumuladas dos resultados de transmissividade seleccionados e possíveis interpretações para o caso dos ensaios de bombagem realizados nos furos PP5B e PP6B .....	148
Figura 6.32. Frequências acumuladas dos resultados de transmissividade seleccionados e possíveis interpretações para o caso dos ensaios de bombagem realizados nos furos PP5B e PP6B e no Poço P1 (Ensaio 4) .....	149
Figura 6.33. Síntese e frequências acumuladas dos resultados de transmissividade ( $m^2/dia$ ) seleccionados e possíveis interpretações para o caso dos ensaios de bombagem realizados nos furos PP5B, PP6B e do Ensaio 4 efectuado no poço P1. ....	150
Figura 6.34. Histogramas cumulativos do número de fracturas por classe de alteração e litologia, com a mesma discriminação da obtida com os ensaios de bombagem. ....	152
Figura 6.35. Imagem simulada da transmissividade (em baixo), expressa em escala logarítmica, e imagens simuladas homólogas da Litologia (em cima, à esquerda) e da Alteração (em cima, à direita). Vistas do Plano XY à profundidade $Z=387,5m$ . ....	153
Figura 6.36. Imagem simulada da transmissividade (em baixo), expressa em escala logarítmica, e imagens simuladas homólogas da Litologia e da Alteração. Vistas do Plano YZ com $X=230300m$ . ....	154
Figura 6.37. Imagem simulada da transmissividade (em baixo), expressa em escala logarítmica, e imagens simuladas homólogas da Litologia e da Alteração. Vistas do Plano YZ com $X=230300m$ . ....	155
Figura 6.38. Estatísticos dos 300 histogramas cumulativos dos resultados de transmissividade simulados. ....	156



Figura 6.39. Mapas binários de duas imagens simuladas da transmissividade, expressa em escala logarítmica e <i>threshold</i> de 3 m <sup>2</sup> /dia. Vistas do Plano XY à profundidade de cota Z= 387,5m...	157
Figura 6.40. Mapas Binários de duas imagens simuladas da transmissividade, expressa em escala logarítmica e <i>valor de corte</i> de 3 m <sup>2</sup> /dia. Vistas do Plano YZ com M=230300.....	158
Figura 6.41. Mapas Binários de duas imagens simuladas da transmissividade, expressa em escala logarítmica e <i>valor de corte</i> de 3 m <sup>2</sup> /dia. Vistas do Plano YZ com M=230500.....	158
Figura 6.42. Visualização 3D de uma simulação da transmissividade, expressa em escala logarítmica e com indicação dos blocos unitários de dimensão 5x5x5 m <sup>3</sup> acima de distintos valores: a) transmissividades superiores a 0,1 m <sup>2</sup> /dia; b) transmissividades superiores a 1 m <sup>2</sup> /dia; c) transmissividades superiores a 3 m <sup>2</sup> /dia; d) transmissividades superiores a 10 m <sup>2</sup> /dia.....	159



## Índice de tabelas

Tabela 2.1. Composição mineralógica parcial dos tipos de granitos identificados na região uranífera da Cunha baixa e Quinta do Bispo com destaque às diferenças relativas entre minerais de origem primária e os resultantes de alteração hidrotermal (neste caso, clorites e mica branca); valores em percentagem (fonte: Matos-Dias e Costa, 1972). ....	6
Tabela 2.2. Graus de alteração em profundidade (percentagem total por troços de 5 metros) dos furos F1B, F2B, F3B, F4B, F5B, PP1A, PP1B, PP5B, PP5A, PP2B, PP2A, PP6B, PP6A, PP3B, PP3A, PP4B e PP4A.....	18
Tabela 3.1. Sondagens analisadas, datas da sua execução, respectivos objectivos e informações passíveis de utilização e tratamento .....	24
Tabela 5.1. Classes de litologias e graus de alteração após reinterpretação dos resultados das sondagens considerados para a construção dos 11 Modelos de Organização das Litologias.....	55
Tabela 5.2. Metragem das diferentes classes litológicas estabelecidas nos modelos interpretativos 4, 5, 8 e 11, após reanálise e interpretação dos dados de partida originais e após a respectiva regularização em suportes de 5 metros.....	64
Tabela 5.3. Metragem das diferentes classes litológicas consideradas modelo interpretativo seleccionado – Modelo 8 - após reanálise e interpretação dos dados de partida originais e após a respectiva regularização em suportes de 5 metros.....	66
Tabela 5.4. Proporções globais de cada litologia dos dados experimentais e dos obtidos por krigagem da indicatiz sem e com condicionamento às duas regiões Z1 e Z2, respectivamente granito biotítico e granito porfiróide.....	69
Tabela 5.5. Proporções globais de cada litologia dos dados experimentais, dos dados obtidos por krigagem da indicatiz e de três imagens simuladas por SIS com desagrupamento por condicionamento às médias locais.....	73
Tabela 5.6. Metragens dos quatro graus de alteração (W1, W2, W3 e W4) por litologia.....	78
Tabela 5.7. Frequências relativas das quatro classes do grau de alteração (W1, W2, W3 e W4) repartidas por intervalos de profundidade de 20 em 20 metros.....	80
Tabela 5.8. Frequências relativas das quatro classes do grau de alteração (W1, W2, W3 e W4), repartidas por dois intervalos de profundidade em função do limite dos 15 metros. ....	80
Tabela 5.9. Frequências relativas dos quatro graus de alteração (W1, W2, W3 e W4), por intervalos de profundidade estabelecidos em função do limite dos 15 metros e por litologia.....	82

Tabela 5.10. Frequências relativas dos quatro graus de alteração (W1, W2, W3 e W4), por intervalos de profundidade estabelecidos em função do limite dos 15 metros e por litologia para o caso de três simulações com reajustamento da classe W4 devido aos níveis de “fracturação fina”.....	89
Tabela 5.11. Frequências relativas das duas classes de Limonitização, repartidas por dois intervalos de profundidade, estabelecidos em função do limite dos 15 metros, e por litologia.....	93
Tabela 5.12. Frequências relativas das fracturas de acordo com as características “inclinação”, “preenchimento” e “abertura”. .....	105
Tabela 6.1. Síntese das observações realizadas nos ensaios de bombagem da campanha de 2007 com destaque a cor azul dos melhores resultados encontrados e seleccionados para tratamento. ....	123
Tabela 6.2. Síntese das observações realizadas nos ensaios de bombagem da campanha de 2007 com destaque a cor azul dos melhores resultados encontrados e seleccionados para tratamento. ....	126
Tabela 6.3. Ensaio 4, valores de transmissividade ( $m^2/dia$ ), obtidos para furos que funcionam como piezómetros na envolvente à corta mineira, e cujos resultados foram possíveis validar e interpretar. ....	144
Tabela 6.4. Ensaio 4, Valores de transmissividade ( $m^2/dia$ ) obtidos para os poços P1, P2, P3 e P4. .	144
Tabela 6.5. Ensaio 4, Valores de transmissividade ( $m^2/dia$ ) obtidos para os furos S2A, S2b, S4A e S4B. ....	145
Tabela 6.6. Resultados de transmissividade seleccionados (a cor azul) para o ensaio realizado no furo PP5B e possíveis interpretações. ....	146
Tabela 6.7. Resultados de transmissividade seleccionados (a cor azul) para o ensaio realizado no furo PP6B e possíveis interpretações. ....	147
Tabela 6.8 Resultados de transmissividade seleccionados para o caso do Ensaio 4 realizado no poço P1 e possíveis interpretações. ....	149

# 1. INTRODUÇÃO

O objectivo principal deste trabalho é apresentar uma metodologia para a construção de um modelo geológico 3D, e respectivos atributos hidrogeológicos, em meios rochosos alterados e fracturados, compostos por Granitos Hercínicos e Metasedimentos do Complexo Xisto-Grauváquico, em que o comportamento hidrogeológico é fortemente condicionado por acidentes estruturais importantes e relacionáveis com fenómenos de mineralização (Matos-Dias e Costa, 1972).

Um sistema aquífero num maciço fracturado é tipicamente uma estrutura geológica onde o fluxo da água ocorre maioritariamente pelo sistema de discontinuidades, em vez dos poros (Pereira e Almeida, 1997; Fialho *et al*, 1998). As discontinuidades ocorrem em todas as escalas, desde as de grandes dimensões com dezenas de metros (observáveis em imagens de fotografia aérea e afloramentos) até às métricas (observadas nas carotes) e centimétricas ou menos. Esta replicação das discontinuidades a todas as escalas torna a caracterização de sistemas fracturados num problema complexo e um tópico de investigação actual e muito aliciante.

Para desenvolver o trabalho de modelação seleccionou-se como caso de estudo o do maciço subjacente e envolvente à antiga **área mineira da Quinta do Bispo** (Figura 1.1) (Matos-Dias e Costa, 1972; Pereira *et al.*, 2004; Pereira *et al.*, 2005). Localiza-se na região centro, no concelho de Mangualde, onde, até um passado muito recente (próximo do término do século XX) se explorou um encrave de metassedimentos com mineralizações de urânio tipo disseminado e *stockwork*. A litologia envolvente é dominada por granitos, ocorrendo, a montante da área mineira, depósitos arcósicos e, a jusante, depósitos aluvionares. As principais razões de escolha desta área para caso de estudo de suporte a esta tese são as seguintes:

- Significativo números de furos, piezómetros e poços que são monitorizados desde 2002 sob responsabilidade da EDM S.A.;
- A existência de resultados de prospecção geofísica;
- A existência de alguns resultados de ensaios de bombagem passíveis de interpretações;
- A existência de sondagens carotadas, com testemunhos, executadas para instalação de piezómetros de largo diâmetro;
- A presença da corta mineira à superfície, sendo possível a visualização de fracturação local nos taludes, ainda que tal facturação inclua os efeitos provocados por uso de explosivos e da descompressão resultante da exploração do maciço.

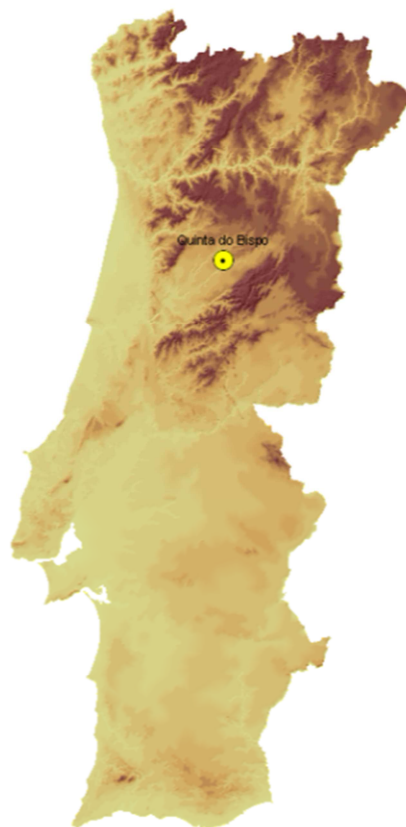


Figura 1.1. Localização da área de estudo na região centro de Portugal.

O considerável número de pontos de água que, desde 2002, é monitorizado nesta área e a localização espacial dos mesmos tornam a Quinta do Bispo num caso particular de entre as antigas minas de urânio do nosso país, tendo-se desde o início dos trabalhos reconhecido e verificado o potencial da utilização da panóplia de informação disponível na tentativa e experimentação com vista à construção de modelos de escoamento segundo níveis de confiança minimamente aceitáveis.

A metodologia de trabalho desenvolveu-se nas etapas principais:

- 1) Revisão da geologia do local, organização e análise da vasta informação disponível sobre o local de estudo, (capítulo 2 e 3) e estabelecimento da metodologia (capítulo 4);
- 2) Pré-processamento e codificação da informação de partida relativa às litologias, alteração, limonitização e fracturação, seguida de análise estatística preliminar onde se quantificam as dependências entre estes atributos (capítulo 5);
- 3) Construção do modelo geológico 3D das litologias, alteração, limonitização e intensidade de fracturação (capítulo 5);
- 4) Análise e interpretação de ensaios de bombagem (capítulo 6);

- 5) Proposta de modelo de transmissividade equivalentes para o local numa malha de blocos 3D (capítulo 6).

O desenvolvimento do trabalho inclui técnicas e algoritmos convencionais juntamente com uma nova abordagem para o estabelecimento da transmissividade equivalente. Como um todo, a abordagem é inovadora e multidisciplinar.

As variáveis objecto do modelo geológico 3D (litologias, alteração, limonitização e fracturação) são tipicamente variáveis das Ciências da Terra que apresentam estrutura espacial podendo e devendo a sua caracterização espacial ser abordada por modelos geoestatísticos de simulação (Almeida, 2010; Quental *et al*, 2012). A aplicação exclusiva de técnicas de ensaio e métodos de tratamento designados por convencionais ou deterministas, muito estabelecidos na comunidade geocientífica para meios porosos, podem resultar em conclusões ilusórias ou em resultados de modelação e simulação pouco representativos da realidade, que é muito heterogénea neste tipo de maciços.

O tipo e procedimentos associados à aquisição de informação sobre o maciço *in situ*, a selecção de informação que traduza as propriedades físicas e químicas deste tipo de meios que se revelem determinantes na construção dos modelos de escoamento, a aplicação de técnicas de simulação matemática para tratamento da informação, assim como, o próprio modo de construção de tais modelos constituem questões que foram ponderadas e exploradas em pelo menos alguma fase neste trabalho.





## 2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

A área em estudo enquadra-se na região uranífera da Cunha Baixa e Quinta do Bispo (Figura 2.1). Nesta região ocorrem em abundância retalhos de micaxistos do complexo xisto-grauváquico, ante-ordovícicos, que sofreram metassomatismo, por vezes, intenso (J.E.N., 1968; Ferreira, 1971). Um pórfiro granítico com direcção E-W, com frequentes rejeitos e possanças que podem alcançar os três metros ocorre na área, a Norte, verificando-se, igualmente, a existência de depósitos terciários de natureza arcósico-terrígena.

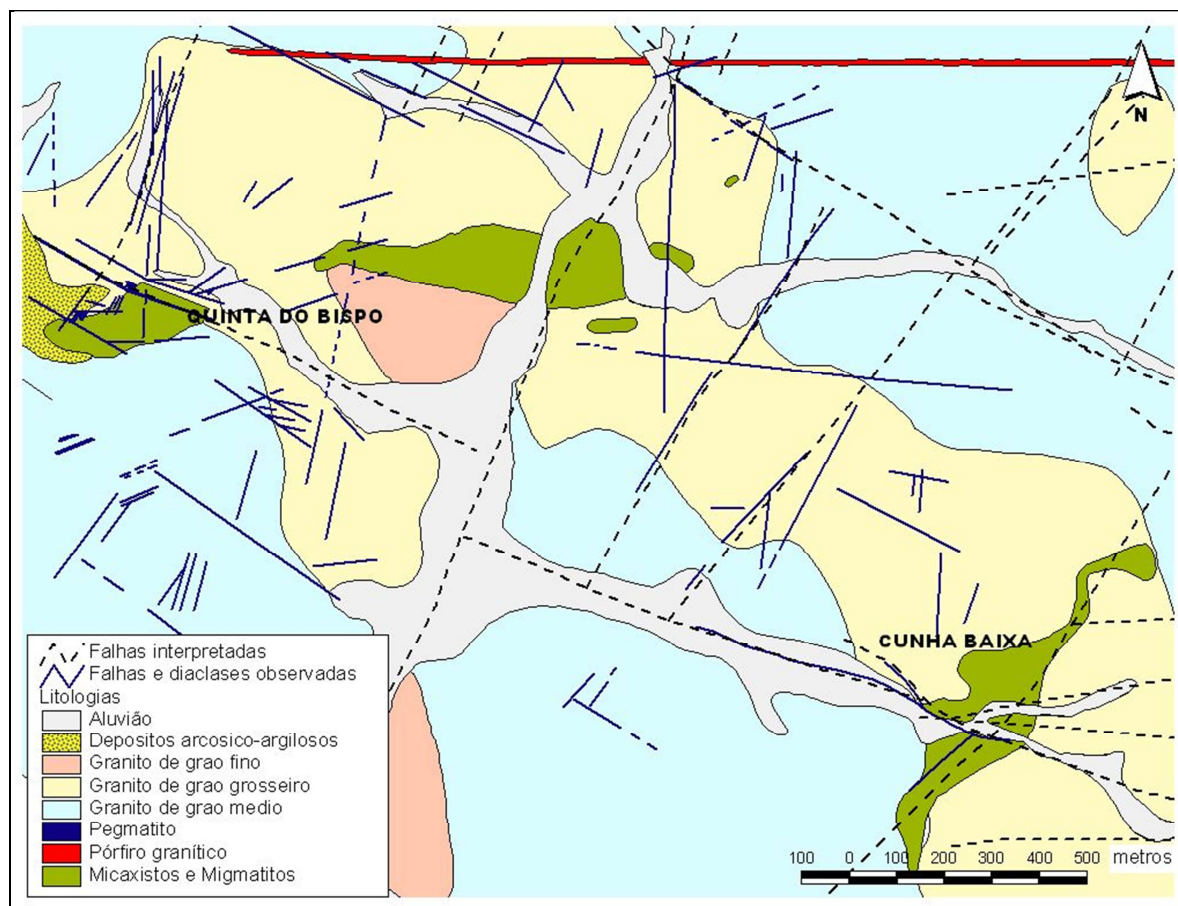


Figura 2.1. Litologias e principais estruturas da região uranífera da Cunha Baixa e Quinta do Bispo (adaptado de Matos-Dias e Costa, 1972)

Na envolvente à área mineira predominam os granitos da série hercínica, monzoníticos, de duas micas, de grão médio a grosseiro, sendo frequente a tendência para o profiroidismo, em particular junto a zonas de contacto com estruturas mineralizadas e encraves de micaxistos. A granularidade destes granitos pode variar em profundidade, o que pressupõe uma localização mais periférica, na fronteira de uma estrutura batolítica, ou que os materiais de natureza granítica terão sido sujeitos à acção de um magma muito fluido que terá intruído lateralmente nas formações.

## CAPÍTULO 2

De acordo com Matos-Dias e Costa (1972), na região uranífera da Cunha Baixa e Quinta do Bispo observam-se três tipos de granitos (ver composição mineralógica média na Tabela 2.1):

- Granito monzonítico biotítico e muscovítico porfiróide de grão grosseiro (Gr1);
- Granito monzonítico de duas micas de tendência porfiróide de grão médio (Gr2);
- Granito monzonítico muscovítico e biotítico de tendência porfiróide e de grão médio a fino (Gr3).

Tabela 2.1. Composição mineralógica parcial dos tipos de granitos identificados na região uranífera da Cunha baixa e Quinta do Bispo com destaque às diferenças relativas entre minerais de origem primária e os resultantes de alteração hidrotermal (neste caso, clorites e mica branca); valores em percentagem (fonte: Matos-Dias e Costa, 1972).

Tipo de Granito	Felds K	Quartzo	Biotite	Moscovite	Mica branca de alteração	Clorite
Gr1	34,6	30,7	5,2	1,5	2,8	0,8
Gr2	27,6	31,6	5,5	3,3	1,8	0,7
Gr3	29,9	31,8	1,6	7,6	0,7	2,3

Na envolvente, os testemunhos de sondagem permitem concluir sobre a ocorrência de duas fácies graníticas predominantes (Figura 2.2)

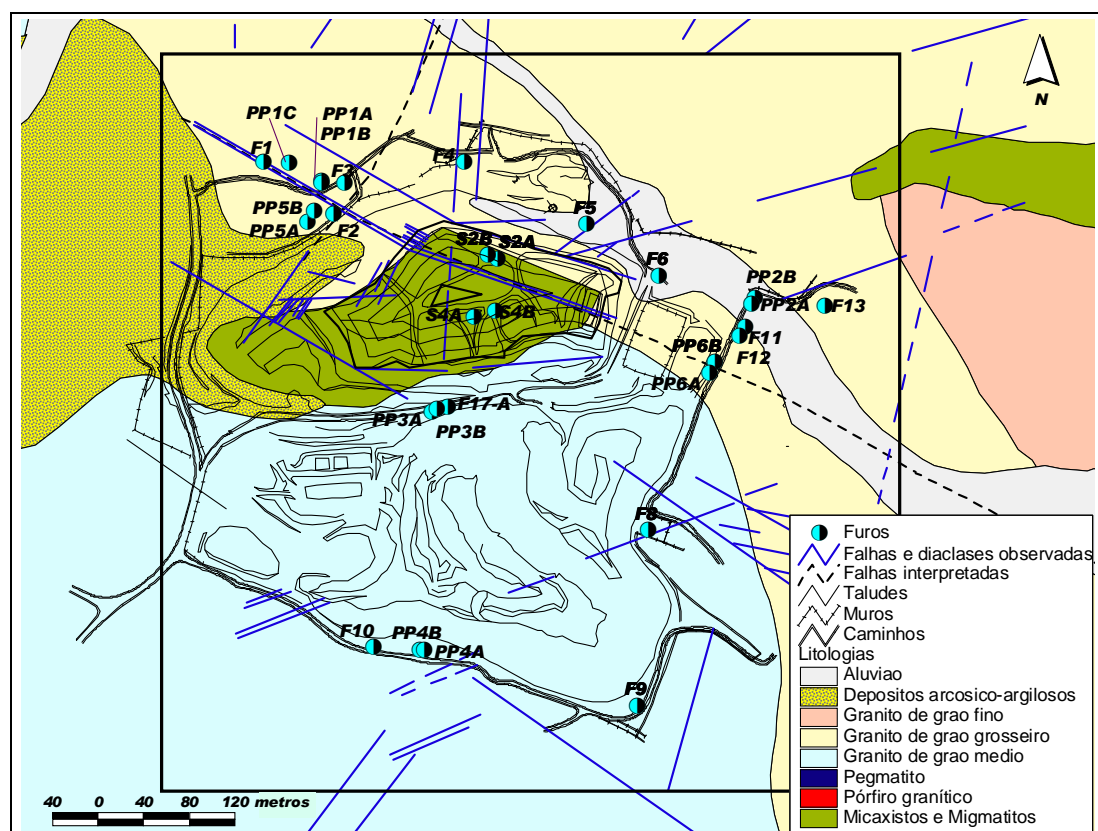


Figura 2.2. Litologias, estruturas e sondagens executadas na área mineira da Quinta do Bispo em diversas campanhas (fonte: EXMIN, EDM)

A primeira ocorre a Norte e Noroeste da corta mineira. É composta por granito de duas micas de grão grosso, porfiróide, onde, por vezes, ocorrem intercalações pegmatíticas (Figura 2.3 e Figura 2.4). Este granito, quando intersectado pelas falhas mais importantes, particularmente de rumo WNW-ESSE a NW-SE apresenta-se bastante sericitizado e argilizado.



Figura 2.3. Testemunhos de sondagem do furo S2B – 25,30 a 28,00 metros de profundidade. Granito de duas micas de grão grosso, porfiróide com acentuados efeitos de sericitização.



Figura 2.4. Testemunhos de sondagem do furo PP5B – 41,90 a 46,40 metros de profundidade. Granito de duas micas de grão grosso, porfiróide com acentuados efeitos de sericitização e caulínização.

A Sul e de Sudeste a Este da corta, verifica-se a predominância de granito de grão médio, predominantemente biotítico, evidenciando efeitos ligeiros de cloritização (Figura 2.5 e Figura 2.6). Em determinadas áreas, a textura pode ter características porfiróides devido à presença de fenocristais tabulares de feldspato.

Estas duas fácies graníticas estarão relacionadas com os granitos do tipo “Gr1” e “Gr2”, descritos por Matos-Dias e Costa (1972) que seguidamente se detalham.





Figura 2.5. Testemunhos de sondagem do furo PP3B – 39,30 a 44,30 metros de profundidade. Granito de grão médio com predominância de biotite, evidenciando efeitos ligeiros de cloritização. A textura porfiróide é devida aos fenocristais tabulares de feldspato.



Figura 2.6. Testemunhos de sondagem do furo S4B – 54,45 a 56,00 metros de profundidade. Granito de grão médio com predominância de biotite, evidenciando efeitos ligeiros de cloritização.

*Granito monzonítico biotítico e muscovítico porfiróide de grão grosseiro (Gr1)* - Nestas rochas a textura é porfiróide, xenomórfica, grosseira com carácter dominante dado pelo feldspato potássico em fenocristais tabulares que excedem os dois centímetros. O quartzo grosseiro é, no geral, de maiores dimensões que a plagioclase e as micas apresentam uma tendência de sub-alinhamento, contornando os cristais de maiores dimensões de feldspato potássico e da plagioclase. A plagioclase encontra-se bastante alterada para mica branca e inclui quartzo. A biotite altera para mica branca e para clorite com exsudação de opacos. A clorite, minérios negros opacos e esfena são produtos de alteração relacionados com a biotite.

*Granito monzonítico de duas micas de tendência porfiróide de grão médio (Gr2)* - A textura destes granitos é xenomórfica a hipidiomórfica-granular com fenocristais de ortoclase (2,5 cm). A plagioclase (oligoclase) xeno-hipidiomórfica (2 a 8mm) encontra-se, por vezes, bastante argilizada apresentando no núcleo alteração mais intensa para mica branca. A biotite, embora de aspecto mais fresco, apresenta as mesmas características que nos granitos Gr1. Os minérios negros opacos e a clorite são acessórios.

Segundo Cotelo-Neiva (1995, 2003a, 2003b), a maioria dos jazigos de urânio encontra-se geneticamente relacionada com granitos porfiróides, grosseiros, hercínicos (308 a 280Ma) que resultaram da diferenciação de um magma híbrido em resultado da mistura de magma básico e de magma granítico anatótico.

Na génese deste tipo de jazigos, não podem, igualmente, ser descurados os efeitos provocados por enriquecimento supergénico que vários autores defendem ser responsáveis pela existência de boa parte dos depósitos urânio, nomeadamente alguns dos mais importantes.

Com efeito, são inúmeras as situações em que as mineralizações originais, que geralmente ocupam fracturas hercínicas, cisalhamentos e fendas de tracção da 3ª fase de deformação – ENE-WSW e NE-SW e desligamentos direitos da 4ª fase de deformação – NNE-SSW, foram sujeitas a remobilizações devidas aos efeitos de reactivação pela tectónica alpinica (Cotelo-Neiva, 1995, 2003a, 2003b).

De acordo com os mesmos autores, os movimentos alpidicos reactivaram as estruturas mineralizadas, permitindo infiltrações de águas meteóricas até profundidades consideráveis, aquecidas em função do grau geotérmico e que solubilizaram parcialmente as mineralizações residentes em filões e nas rochas encaixantes.

Estas águas meteóricas, ao infiltrarem-se ao longo de extensas e profundas falhas e cisalhamentos, e ao acumularem-se em numerosas fendas de alguns centímetros a dezenas de metros em locais de maciços rochosos muito tectonizados foram, a pouco e pouco, por solubilização parcial, enriquecendo a sua composição em elementos mineralizantes.

Ainda de acordo com o mesmo autor, estas águas ascenderam em função da pressão hidrostática das colunas de infiltração e de correntes de convecção, e terão dado origem, quer em armadilhas litológicas - filões de aplitos, pegmatitos quartzíticos e rochas básicas -, quer em armadilhas estruturais - poros, diaclases, falhas, plurifissuras e cisalhamentos -, a jazidas uraníferas mais recentes.

De entre as diferentes tipologias de ocorrência, é possível distinguir os seguintes tipos de jazidas uraníferas em Portugal (Cotelo-Neiva, 1995, 2003a, 2003b): (1) filões de quartzo; (2) filões de quartzo-jaspe e/ou calcedónia; (3) “stockworks” e dissiminações em xistos e granitos; (4) brechas filoneanas, graníticas ou xistentas, quartzo-limoníticas; (5) vénulas de pecheblenda e fluorite; (6) impregnações secundárias; (7) depósitos lacustres.

## CAPÍTULO 2

Na área da Quinta do Bispo, foi explorado um encrave de metassedimentos do complexo xisto-grauváquico, com mineralizações do tipo *stockwork* e tipo disseminado (Figura 2.7), sendo que é, igualmente, possível constatar, a partir dos registos de radiometria das sondagens analisadas, a existência de enriquecimentos nas zonas de contacto entre os granitos profiróides e os metassedimentos e em brechas filoneanas, compostas por granito esmagado ou de natureza quartzo-limonítica (Figura 2.8).

Verifica-se, igualmente, a existência de enriquecimentos em áreas de granito que apresentam estrutura pegmatítica (Figura 2.9).



Figura 2.7. Corta mineira resultante da exploração de xenólito composto por metassedimentos do complexo xisto-grauváquico, com mineralizações do tipo “stockwork” e tipo disseminado (*fonte*: Arquivos fotográficos da EDM, S.A.).



Figura 2.8. Testemunhos de sondagem do furo PP4B – 52,00 e 56,40 metros de profundidade. Exemplo de granito brechificado, bastante hematitizado e limonitizado. A esta profundidade os logs radiométricos efectuados acusam elevados teores em urânio, entre 90 a 150 c.p.s. (GMT-3T).



Efeitos de pigmentação resultantes da libertação de ferro devido a alteração da biotite (cor “vermelho sanguíneo”) e do enriquecimento do teor em ortoclase

Alternância na predominância do tipo de mica (biotite e muscovite)



Figura 2.9. Testemunhos de sondagem do furo PP1B – 74,80 e 80 metros de profundidade.

Com efeito, na região uranífera da Cunha Baixa e Quinta do Bispo, são usuais as diferenciações pegmatíticas que ocorrem associadas a granitos de granulariedade média a grosseira, surgindo preferencialmente nas proximidades de fácies porfiróides e/ou junto às zonas de contacto com os retalhos de micaxistos.

É de referir que a área em estudo se situa próximo do importante Campo Pegmatítico de Mangualde. Os filões pegmatíticos deste campo exibem possanças muito variáveis (de alguns centímetros a metros) e podem surgir sob a forma de diques verticais ou bolsadas irregulares a partir das quais irrompem numerosas apófises.

Um aspecto interessante e a relevar é o de que os resultados das sondagens situadas a NW da corta, nomeadamente dos furos de sondagem PP1B, F1B e F4B, permitem, em alguns casos, identificar, e, noutros, indiciam a ocorrência, em profundidade, de uma fácies pegmatítica (Figura 2.9). Sobrejacente e lateralmente a esta fácies constata-se existir um notório aumento nos efeitos de porfiroidismo nas fácies graníticas de granulariedade grosseira, as quais podem também ser intersectadas por intercalações de natureza pegmatítica (Figura 2.10).



Figura 2.10. Furo PP1B – 63,00 e 70,10 metros (à esquerda) e Furo PP5B – 5,00 e 10,45 metros (à direita). Granitos de duas micas, de grão grosseiro, porfiróides, intersectados por intercalações de natureza pegmatítica. Nestes granitos, em particular nas proximidades de uma importante falha com direcção N70W que intersecta a corta são bastante acentuados os efeitos de sericitização e argilização dos granitos.

Na área são diversos os efeitos dos fenómenos de alteração hidrotermal que se verificam e que se podem observar directamente a partir dos testemunhos de sondagem. Segundo Coteló-Neiva (1995, 2003a, 2003b), é possível considerar os seguintes efeitos resultantes de fenómenos de metassomatismo em zonas de contacto entre os granitos e os filões uraníferos: (1) albitização da plagioclase; (2) enriquecimento do teor de ortoclase da microclina; (3) recristalização dos feldspatos; (4) recristalização da moscovite; (5) moscovitização da plagioclase (que pode ser total) e de parte da microclina; (6) alteração da ilmenite; (7) alguma descoloração da biotite seguida de cloritização desta; (8) hematização (rubefacção) da microclina pelo ferro libertado quando da alteração da biotite; (9) formação de epidoto; (10) caulinitização dos feldspatos; (11) impregnação de sulfuretos, principalmente pirite; (12) carbonatações, com formação principalmente de calcite; (13) formação de fluorite; (14) silicificações microcristalinas (jasperização e/ou calcedonização).

Alguns dos fenómenos de alteração metassomática indicados por estes autores e os de enriquecimento em armadilhas litológicas ou estruturais, devidos a fluidos de origem meteórica, são identificáveis ou interpretáveis nos testemunhos de sondagem analisados, tendo servido, inclusivamente, de base para o estabelecimento de um conjunto de indicadores mineralógicos que veio a facilitar e melhorar as interpretações litológicas e a análise das relações espaciais entre falhas e fracturas que têm vindo a ser realizadas.

De acordo com o exposto, e o tipo de informação disponível nos boletins de sondagem e em imagens dos seus testemunhos, nas interpretações de natureza geológica foram considerados diferentes tipos de *Indicadores*:

- *Indicação do tipo de granitos e efeitos de alteração*: cor da matriz (esbranquiçada, amarelada, rosada, cinzento escuro, avermelhada), dimensão dos grãos, tipo de micas (predominâncias e relações entre micas brancas e biotite), presença e cor dos minerais argilosos (esbranquiçados, amarelados, avermelhados, esverdeados), quartzo (cristalinidade e modo de ocorrência), efeitos de breechificação, de hematização, de limonitização e/ou cloritização (Cerveira, 1951; Martins, 1959; Cameron, 1959; Matos-Dias e Soares-de-Andrade, 1970; Matos-Dias e Machado, 1980; Fernandez-Turiel *et al.*, 1991, Fernandes, 1994);
- *Análise da relação espacial e distinção entre tipo e famílias de falhas e fracturas* de acordo com as composições dos materiais de preenchimento, em particular: presença de micas brancas (sericitização), existência e cor dos minerais argilosos (esbranquiçados, amarelados, avermelhados, esverdeados), ocorrência de quartzo, carbonatos, sulfuretos ou de minerais de urânio.

Neste contexto, destaca-se a identificação em profundidade, nos furos F1B, F3B e F4B, de uma estrutura bastante mineralizada com valores de radiometria elevados, e, que, muito provavelmente, induz no granito intersectado efeitos de sericitização, hematitização (Martins, 1959) e argilização.



Foram observadas estruturas similares a sul da corta, nos piezómetros PP3B e PP4B (Figura 2.11), sector no qual os efeitos de cloritização em resultado da maior predominância de biotite nos granitos ocorrentes são mais notórios.



Figura 2.11. Furo PP4B – 56,40 a 61,00 metros de profundidade (em cima) e Furo PP3B – 53,00 a 57,00 metros de profundidade (em baixo). Granito de grão médio, de duas micas, predominantemente biotítico e que no seio e junto a estruturas brechificadas apresenta pronunciados efeitos de hematitização e cloritização. Nestes furos, nas proximidades destas estruturas, também se identificam efeitos de sericitização e argilização.

Segundo Matos-Dias e Costa (1972), a tectónica regional é dominada por dois sistemas de falhas, possivelmente conjugadas, um de direcção NE-SW e outro NNW-SSE, de provável idade Hercínica.

Localmente, um pórfiro granítico terá intrudido segundo uma fractura E-W, considerada mais antiga. Os sistemas NE-SW e WNW-SSE são claramente dominantes e ter-se-ão formado por compressão de orientação ENE-WSW, movimentando-se as falhas conjugadamente. Em fase subsequente, mais tardia, pressões SE-NW terão feito rejogar o sistema anterior no sentido vertical e horizontalmente com movimento contrário ao primitivo, o que terá induzido intensa brechificação do quartzo que se encontrava intrudido no sistema conjugado.

De acordo com os mesmos autores, em termos estruturais, na região uranífera da Cunha Baixa – Quinta do Bispo, os sistemas de fracturas NW-SE a WNW-ESSE, produtivos em urânio, apresentam coordenadas regulares quando cortam o granito, estando preenchidas por quartzo que se apresenta brechificado ou em placas coladas aos encostos, induzindo, comparativamente com as falhas do sistema NE-SW, maior sericitização da rocha encaixante.

Na área da Quinta do Bispo é de relevar a existência de falhas de direcção N65-70E a N75E (Figura 2.12) que comumente apresentam caixas de largura relevante (superiores a 0,5 metros e podendo alcançar um metro de possança), compostas por filões de quartzo bandeado e/ou brechificado, e apresentando os encostos aos granitos esmagados e alterados. Esta é uma situação aplicável aos casos do Poço 8 e dos Furos F8, F11, F12 e F13, situados no limite a Nordeste e a Este da área mineira, locais em que no decorrer dos trabalhos de furação foram intersectadas falhas produtivas, muitas das quais associadas a filões de quartzo (Figura 2.12).

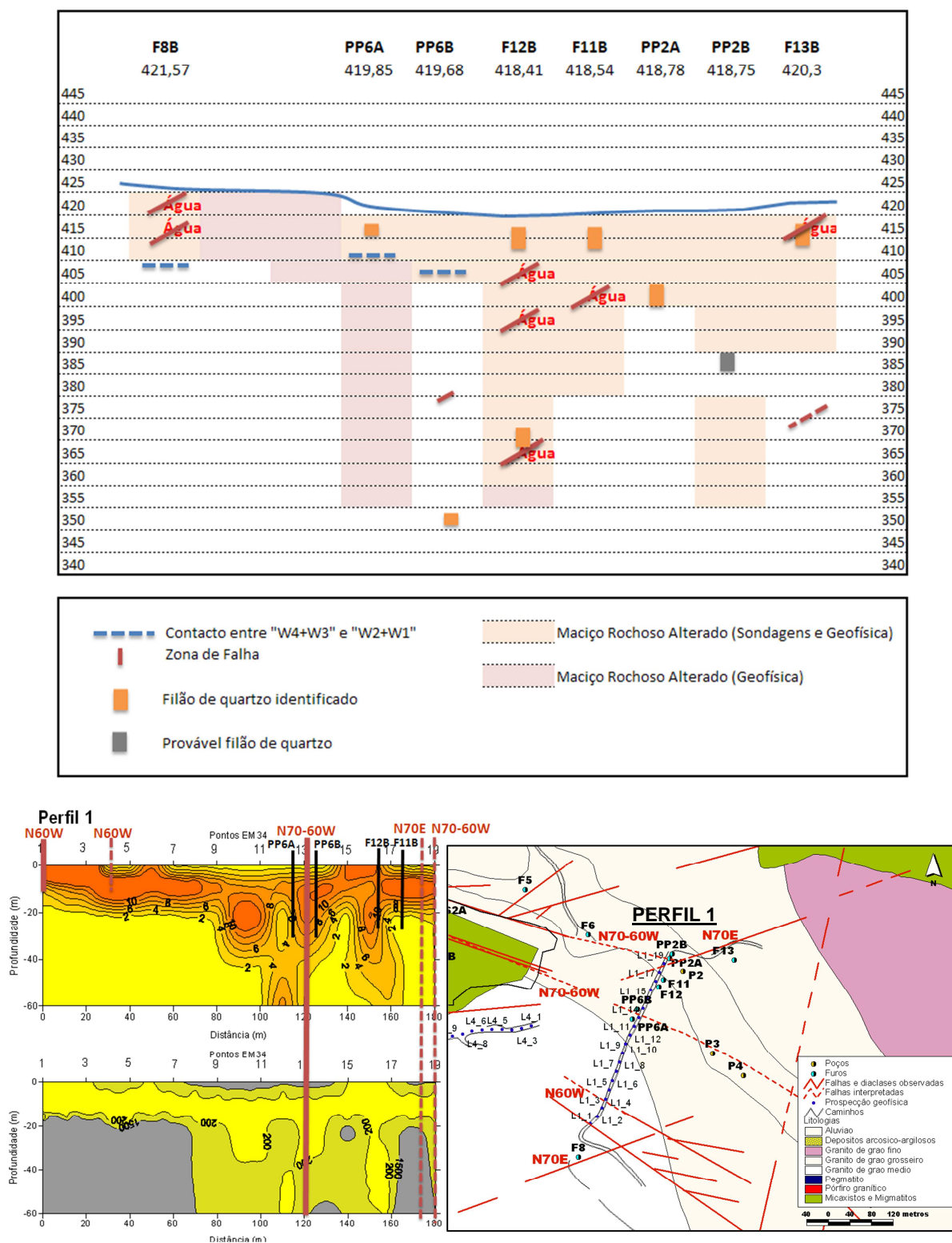


Figura 2.12. Pseudo-seção F8B-PP6A-PP6B-F12B-F11B-PP2A-PP2B-F13B com indicação de principais zonas de falha, filões de quartzo intersectados e locais que indicaram surgência de água. Correspondência com a cartografia de fraturas do local e perfis de condutividade e resistividade (adaptações sem escala; fonte dos perfis: Carvalho *et al.*, 2005).

Igualmente, a Sul, os furos F10 e F9, e a Norte, os Furos F5 e F6, apresentam falhas produtivas que, pelos levantamentos cartográficos existentes e pelas semelhanças com os furos F8, F11, F12 e F13, deverão corresponder às falhas de direcção N65-70E a N75E, preenchidas por quartzo.

Por sua vez, ocorrem igualmente nesta área falhas de direcção N60W a N70-80W (Figura 2.12) com caixas de grande possança, de pelo menos 1 metro, constituídas por brecha, cujo granito original se apresenta muito esmagado e alterado (fortemente argilizado). Estas caixas de falha são por vezes intersectadas por veios de quartzo de exsudação, estes por sua vez brechificados e com hidróxidos de ferro de cor acastanhada. Esta é uma situação que ocorre nas proximidades do furo F8, o qual se sabe estar sujeito à recepção de escoências provenientes da zona da escombreira por via dos dois tipos de falhas (N65-70E a N75E e N60W).

Existirão pois efeitos de sobreposição onde, numa matriz seja com funcionamento essencialmente por porosidade em áreas mais alteradas, seja de natureza rochosa, os escoamentos poderão ser facilitados pelas falhas N-S ou do quadrante NE, com quartzo, ou, em maiores profundidades, pela existência de filões de granito brechificado que funcionarão como canais preferenciais dos escoamentos a maiores distâncias (Figura 2.13).

Exemplo desta situação pode ser a do furo PP1B, em que o histórico das medições de níveis piezómetros indica cotas muito próximas das da ocorrência de quartzo, indiciando a presença de um filão, situado entre as cotas 415 e 420 (Figura 2.13).

Este será igualmente o enquadramento atribuível ao caso dos furos que se encontram na ou intersectam a estrutura principal desta área, e que apresentam fortes efeitos de alteração sericítica e argilítica até maiores profundidades, situação que ocorre quer a Nordeste, quer a Noroeste da área mineira, nomeadamente em F1B, F2B, F3B, PP1B, PP1A, PP2B e PP2A, PP5B e PP5A (Figura 2.14 e Tabela 2.2).

Igualmente produtivo é o conjunto de fracturas do quadrante ENE, (NS, N15E e N20E), isoladamente, ou no cruzamento com N70E, N70-80W (Figura 2.13).

Esta é uma situação que se verificará no caso do furo F4B (Figura 2.13), que se encontra sob o efeito directo de falhas N-S sub-verticais, produtivas, e, muito provavelmente, dos furos F2B e F3B, pela intersecção com falhas detectadas na fase de furação e possivelmente pertencentes do quadrante ENE, isto não obstante os efeitos de argilização intensa, devido à sua proximidade com a estrutura principal N60-70W.

Ainda no caso do furo F4B e, também, dos furos F2B, F3B, PP1B, PP3B, PP4B, é igualmente de destacar a detecção em profundidade de filões de granito fortemente brechificado, com evidências de oxidação e efeitos de limonitização (Figura 2.13) que, no caso de PP3B e PP4B, se encontram

inseridos numa matriz rochosa composta por granitos supra e subjacentemente são ou muito pouco alterados.

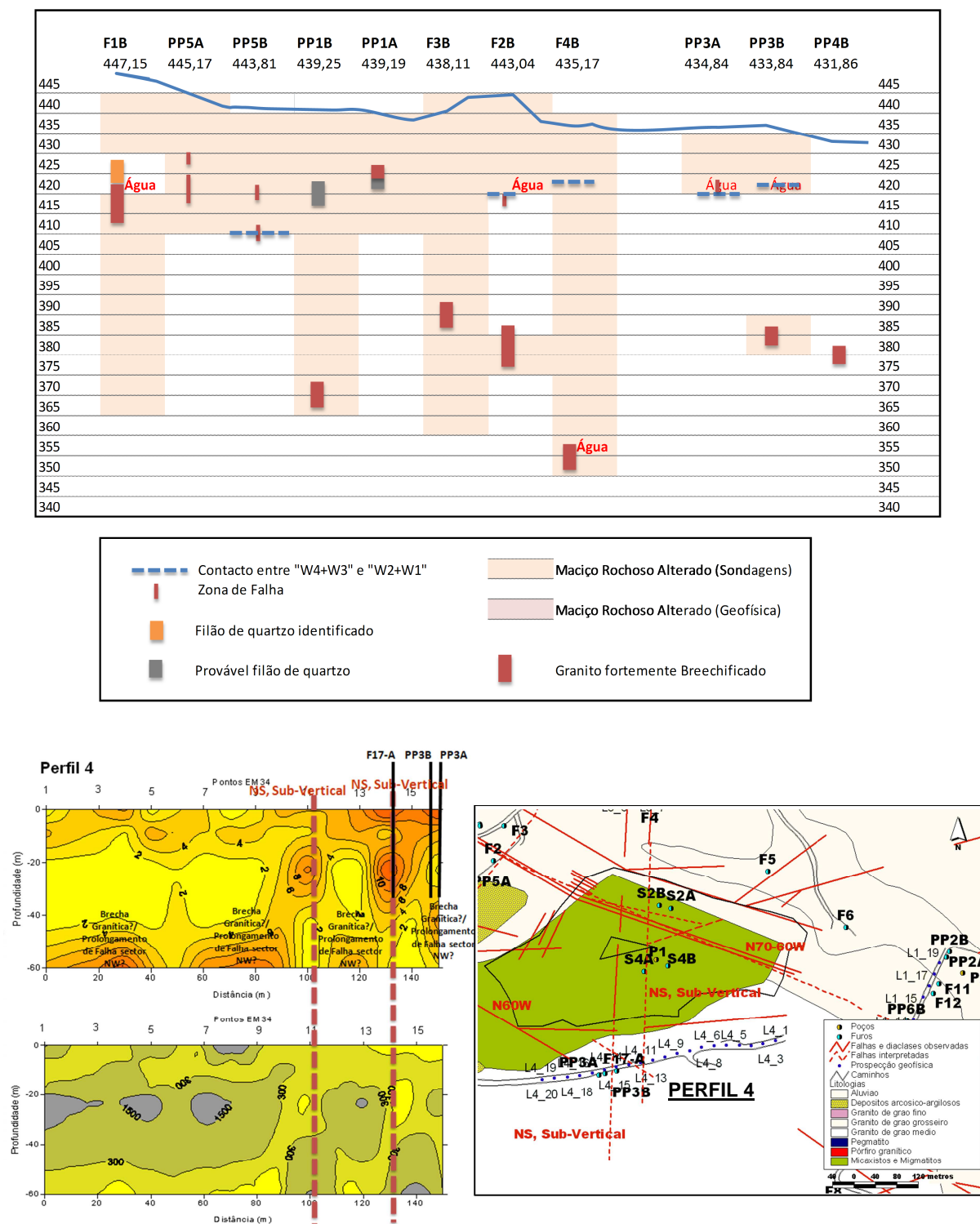


Figura 2.13. Furos F1B, F2B, F3B, F4B, PP1B, PP1A, PP5B, PP5A, PP3A, PP3B e PP4B com indicação de principais zonas de falha, filões de quartzo intersectados, locais que indicaram surgência de água e zonas com granito brechificado. Correspondência com a cartografia de fraturas do local e perfis de condutividade e resistividade (adaptações sem escala; fonte dos perfis: Carvalho *et al.*, 2005).

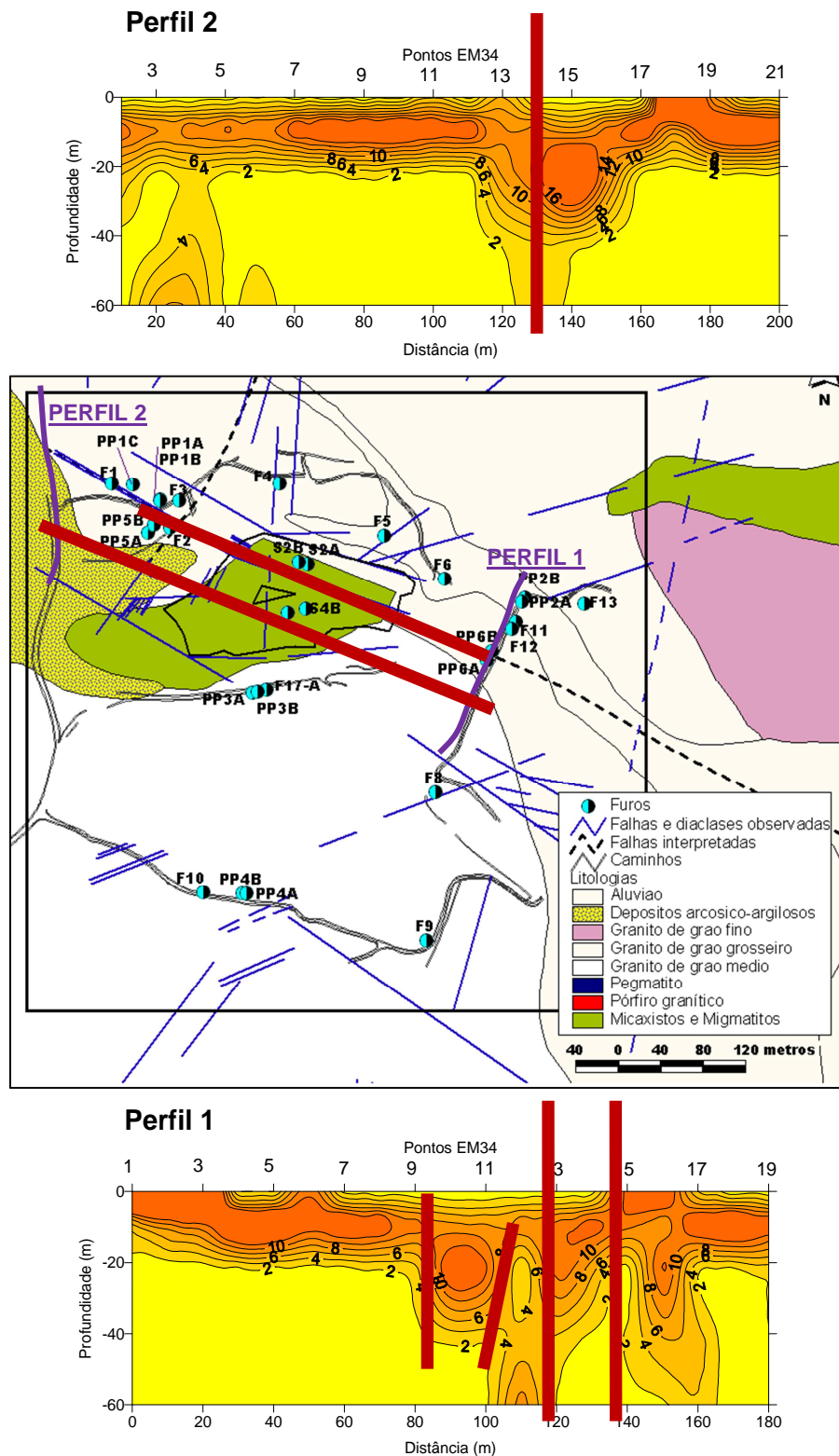


Figura 2.14. Possível interpretação relativa à localização e representação espacial da estrutura principal que intersecta a área (adaptações sem escala; fonte dos perfis: Carvalho *et al.*, 2005).

Verificam-se incrementos a maiores profundidades nos perfis de condutividade e de resistividade do perfil 4 (Figura 2.13), suprajacentemente descontinuados, que poderão ser explicados, quer pela existência de uma importante estrutura Falha N60-70W, direita, que, entretanto, se prolonga para o hastear SW do céu-aberto, quer pela existência de filões de granito fortemente brechificado a maiores profundidades, que são produtivos, e, aparentemente, com possível ligação, pelo menos entre F4B, PP3B e PP4B (Figura 2.13).

A análise conjunta dos perfis 1, 2 e 4 (Figura 2.12 a Figura 2.14) evidencia o papel importante que a estrutura principal, que se constitui numa Falha N60-70W, e que intersecta a área com possanças que podem chegar aos 10 metros, terá, na perpetuação de escoamentos, neste caso, dados essencialmente por porosidade, embora localmente a existência de falhas, filões com quartzo ou filões de granito brechificado possam contribuir para a existência de escoamentos em canais condutores preferenciais.

Igualmente, as descontinuidades existentes entre os níveis de alteração do granito e as resultantes das diferenças de litologia existentes no local serão, certamente, áreas que facilitarão os escoamentos a 3D.

Tabela 2.2. Grau de alteração em profundidade (percentagem total por troços de 5 metros) dos furos F1B, F2B, F3B, F4B, F5B, PP1A, PP1B, PP5B, PP5A, PP2B, PP2A, PP6B, PP6A, PP3B, PP3A, PP4B e PP4A.

Profundidade	F1B	F2B	F3B	PP1B	PP5B	PP5A	F4B	F5B	PP2B	PP2A	PP6B	PP6A	PP3B	PP3A	PP4B	PP4A
(m)	W3+W4	W3+W4	W3+W4	W3+W4	W4+W3	W4+W3	W3+W4	W3+W4	W3+W4	W3+W4	W3+W4	W3+W4	W3+W4	W3+W4	W3+W4	W3+W4
0	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0%	100%
5	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	2%	27%
10	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	54%	100%	100%	72%	33%	75%	100%	3%	12%
15	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	15%	0%	20%	27%	0%	0%
20	87%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	6%	
25	93%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	66%	100%		0%	0%	5%		0%	
30	100%	9%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	59%		11%	0%	25%		10%	
35	100%	0%	100%	100%	100%		100%	100%	0%		0%		18%		0%	
40	100%	0%	100%	100%	62%		100%	100%	47%		0%		3%		0%	
45	100%	0%	100%	100%	14%		100%	100%	100%		26%		34%		0%	
50	100%	0%	100%	100%	0%		100%	100%	100%		8%		82%		0%	
55	100%	0%	100%	100%	74%		100%	100%	100%		17%		26%		1%	
60	100%	91%	100%	100%	14%		100%	100%	100%		6%		38%		0%	
65	100%	89%	100%	100%	8%		100%	100%			0%		20%			
70	100%	0%	100%	52%	0%		100%	100%			4%		11%			
75	100%		100%	0%	0%		100%	100%			0%					
80	100%			0%	0%		100%				0%					
85							100%									
90							100%									
95							100%									

Estruturalmente são aspectos importantes e de relevar:

- As **falhas N60W e N70E**, existentes sob a escombreira da Quinta do Bispo, junto ao Furo F8 e ao poço P8 (P154), constituem canais de percolação:
  - A **falha N60W**, apresenta uma caixa com cerca de 1 m, constituída por brecha, cujos elementos de granito estão muito esmagados e alterados, veios de quartzo de exsudação, por vezes brechificados e hidróxidos de ferro de cor acastanhada;



- A **falha N70E**, apresenta uma caixa com 0,70 m, sendo composta por um filão de quartzo bandeado e brechificado, apresentando o encosto ao granito esmagamento e alteração;
- A **Falha N60W**, direita, e que se **prolonga para o hasteal SW**, corta o contacto xenólito/granito, com rejeito à direita e amplitude métrica.
- A **Falha N70W**, com movimentação direita. Caixa com possança de 10 m, constituída por brecha cujos elementos de granito estão muito esmagados e alterados (argilitização dos feldspatos intensa), veios de quartzo de exsudação, por vezes brechificado, com diferentes espessuras e graus de cristalinidade, e vénulas de hidróxidos de ferro de cor acastanhada. Esta falha corta o conjunto ENE, sendo responsável pelo controlo do hasteal NE.
- A zona de nascente húmida existente no hasteal NE (Figura 2.15) apresenta-se com vegetação rasteira verde no pino do Verão, podendo coincidir com ou materializar uma fractura **N-S**. No exterior do céu aberto foi confirmada a existência desta fractura, **N-S; Vertical**, que também produz um lineamento interpretado no ortofoto.



Figura 2.15. Hasteal NE da corta mineira. Notar a zona esverdeada no talude NE, eventualmente coincide com fractura vertical NS (Fonte: EDM, EXMIN).





### 3. ORGANIZAÇÃO E ANÁLISE DA INFORMAÇÃO DISPONÍVEL

Numa primeira fase, para além de pesquisas bibliográficas diversas respeitantes a variados temas, a actividade desenvolvida cingiu-se ao levantamento e organização da informação disponível sobre propriedades físicas, estruturais e hidráulicas do maciço rochoso tendo por base (*fonte*: EXMIN, 2001 a 2005; EDM, 2005 a 2008):

- Boletins de registo e imagens de testemunhos de sondagens que se realizaram na área em diversas datas e sob distintos objectivos;
- Um estudo fotogeológico realizado sobre a região;
- Um levantamento cartográfico de falhas e sistemas de diaclases identificáveis à superfície do terreno ou observáveis em afloramentos e em áreas expostas dos taludes da corta mineira;
- Perfis de prospecção geofísica realizados na envolvente à corta;
- Informação de natureza geológica disponível, integrada em SIG com base em cartografia à escala 1:5.000;
- Resultados de ensaios de permeabilidade – tipo Lugeon – e de ensaios hidrogeológicos de bombagem realizados na área em duas campanhas distintas.

O levantamento efectuado permitiu perspectivar a possibilidade de utilização de um conjunto de diferentes propriedades, que reflectem as características intrínsecas e estruturais do maciço rochoso (Baecher *et al.*, 1977; Grossman, 1988), associando-se a estes resultados de ensaios de permeabilidade e de bombagem. Sob este objectivo, foram preparadas matrizes de dados de partida, respeitantes às seguintes características:

#### **1. Litologia**

#### **2. Alteração**

#### **3. Recuperação (%) e RQD (%)**

#### **4. Limonitização na matriz e em fracturas**

#### **5. Níveis de água intersectados (zonas produtivas do maciço)**

#### **6. Indicadores geológico-estruturais**

Intersecção de falhas

Intersecção de filões, veios ou filonetes

Intersecção de brechas

Intersecção de pegmatitos/ níveis pegmatíticos

## **7. Indicadores mineralógicos**

Indicação do tipo de granitos e efeitos de alteração: cor da matriz, dimensão dos grãos, tipo de micas (predominâncias e relações entre micas brancas e biotite), cor dos minerais argilosos (esbranquiçados, amarelados, avermelhados, esverdeados), quartzo (tipo de mineral e seu modo de ocorrência), efeitos de brechificação, de hematitização e/ou cloritização;

Relação espacial e distinção entre o tipo e famílias de falhas e de fracturas

Tipo de preenchimentos: presença de micas brancas (sericitização), existência e cor dos minerais argilosos (esbranquiçados, amarelados, avermelhados, esverdeados), ocorrência de quartzo, carbonatos, sulfuretos ou de minerais de urânio;

## **8. Fracturação**

Contagem do número de fracturas

Inclinação

Grau de abertura

Preenchimento – conforme indicadores estabelecidos e de acordo com as seguintes classes:

Fracturas sem preenchimento, fracturas com algum preenchimento, fracturas bastante preenchidas;

Preenchimento essencialmente arenoso, preenchimento essencialmente argiloso, preenchimento areno-argiloso;

Existência ou inexistência de óxidos nas superfícies das fracturas.

## **9. Ensaio de permeabilidade tipo Lugeon**

Valores de permeabilidade (em Unidades Lugeon)

Variâncias locais no maciço que induzem diferentes tipos de escoamentos (laminar, turbulento, fracturação hidráulica)

Indicação qualitativa sobre tipo de fracturação (fina ou grosseira) e preenchimentos de fracturas

## **10. Ensaio hidrogeológico de bombagem**

- Resultados de transmissividade e coeficiente de armazenamento

## **11. Níveis piezométricos medidos em furos e piezómetros**

## **12. Resultados de análises químicas de amostras de águas colhidas em furos e piezómetros**

## **13. Resultados de estação meteorológica instalada na área**

Neste estudo considerou-se a informação respeitante a um total de 29 sondagens, que perfazem cerca de 1 400 metros. Analisaram-se e seleccionaram-se as características que, isoladamente ou em

conjunto, podem ser consideradas e integradas para o estabelecimento de Unidades Hidráulicas que expressem as heterogeneidades e o funcionamento hidrogeológico do maciço rochoso (Lukes, 2005; Chambel, 2006; Marques, 2007).

As sondagens consideradas para levantamento dos dados de partida foram executadas em datas distintas e sob objectivos, por vezes, diferenciados, tendo-se verificado a necessidade de conciliar o maior número de informações possíveis obter nas diversas campanhas e passíveis de futura utilização na construção de matrizes respeitantes às propriedades da matriz rochosa, de falhas e de fracturas (Oda, 1985; Gomes, 1988; Grossman, 1988).

Sobre estas heterogeneidades importa referir que, em alguns casos, como o da densidade da fracturação, a variabilidade dos dados pode variar entre as escalas métrica a centimétrica. A Figura 3.1 mostra um exemplo de variabilidade e heterogeneidade da fracturação no furo PP4B entre as profundidades de 13,8 e 18,4 metros. O tipo de informação possível obter a partir das diferentes campanhas realizadas apresenta-se na Tabela 3.1.

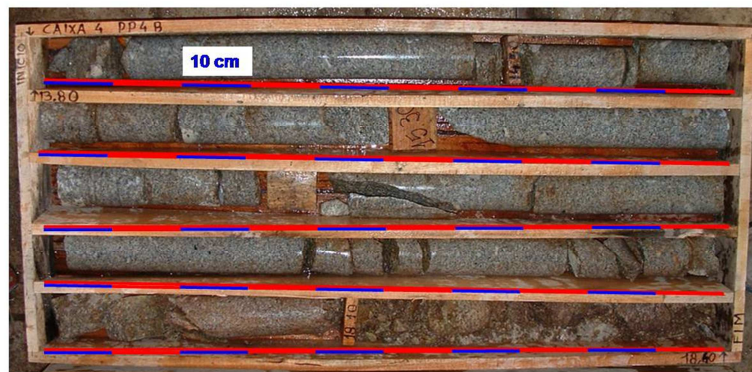


Figura 3.1. Testemunhos de sondagem do furo PP4B - 13,80 a 18,40 metros de profundidade

Tabela 3.1. Sondagens analisadas, datas da sua execução, respectivos objectivos e informações passíveis de utilização e tratamento

Ref.º	Profundidade de Investigação (m)	Data de Execução	Objectivos e Métodos de Execução	Tipo de Informação existente										Resultados de ensaios de permeabilidade <i>in situ</i>
				Boletins de registo	Testemunhos de sondagens	Litologias	Grau de Alteração	Recp (%)	RQD (%)	Falhas e fracturas	Níveis de água intersectados na furação	Indicadores mineralógicos	Radiometria	
F1R	78,00	1993	Furação destrutiva. Construção de piezómetros para monitorização hidroquímica da envolvente	Sim	Não	Indicação genérica do tipo de litologia intersectada, grau de dureza e cor	Sim	Não	Não	Não é possível realizar uma análise detalhada das condições de fracturação	Sim	Não	Sim	Não
F2R	72,00													
F3R	76,00													
F4R	91,00													
F5R	78,00													
F6R	34,00													
F8R	30,00													
F9R	31,00													
F10R	33,00													
F11R	36,50													
F12R	66,00													
F13R	70,00													
PP1A	25,00	2005	Sondagens carotadas. Construção de piezómetros para monitorização hidroquímica da envolvente	Sim	Sim	Descrição bastante completa do tipo de litologia com referência a cor,	Sim	Sim	Sim	É possível realizar uma análise detalhada das condições de fracturação	É indicada a evolução dos níveis	Sim	Sim	Ensaio Lugeon
PP1B	80,00													
PP1C	65,10													
PP2A	19,20													
PP2B	60,00													
PP3A	70,20													
PP3B	20,00													
PP4A	15,40													
PP4B	65,20													
PP5A	30,00	2007	Sondagens carotadas. Monitorização hidroquímica	Sim	Sim	Indicação do tipo de litologia com	Sim	Sim	Sim	É possível realizar uma análise	Não	Parcial	Sim	Ensaio de Bombagem
PP5B	78,60													
PP6A	30,10													
PP6B	80,30													
S2A	14,00	2008	Sondagens carotadas. Monitorização hidroquímica	Sim	Sim	Indicação do tipo de litologia, por vezes,	Sim	Sim	Sim	É possível realizar uma análise	Não	Parcial	Sim	Ensaio Lugeon
S2B	20,60													Ensaio de Bombagem
S4A	24,50													
S4B	24,50													

Seleccionaram-se características da matriz rochosa, de falhas e de fracturas que poderão influenciar directa ou indirectamente o modo como os escoamentos se propagam na área em estudo, considerando-se todos os troços de sondagem em que o maciço rochoso *in situ* foi intersectado (*Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow; U.S. National Committee for Rock Mechanics, Geotechnical Board, Board on Energy and Environmental Systems, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council, 1996; Chambel, 2006*).

Dadas as diferenças comportamentais em termos físicos e do modo como se perpetuam os escoamentos entre “maciços rochosos” e “maciços terrosos” (*s.l.*), foram excluídos da análise as sondagens ou troços de sondagem que intersectaram os materiais estéreis ou minérios de diversos teores e granulometrias extraídos e depositados na corta, restringindo-se propositadamente a análise apenas ao maciço rochoso *in situ*.

Paralelamente, em auxílio e como complemento às interpretações e à preparação dos dados das sondagens, recorreu-se a demais informações disponíveis, de diversa natureza, nomeadamente as respeitantes a estudos fotogeológicos, a levantamentos cartográficos de falhas e sistemas de diaclases em áreas expostas ou aflorantes do maciço rochoso e a perfis de prospecção geofísica.

Conjugando-se a informação disponível sobre esta área, foi possível:

- Verificar possíveis relações espaciais entre falhas observadas em levantamentos de campo e falhas intersectadas em profundidade nas sondagens;
- Identificar “corredores” de alteração preferenciais, associados a falhas que intersectam a área em estudo;
- Identificar potenciais zonas produtivas em termos hidrogeológicos;

- Detectar evidências de estruturas que intersectam o maciço rochoso a maiores profundidades, por vezes, produtivas, e que induzem aumentos significativos e localizados nas condutividade e mudanças nas resistividades obtidas em perfis geofísicos;
- Melhorar a matriz respeitante à propriedade “Grau de Alteração” mais completa ao associarem-se os resultados do tratamento dos boletins de sondagem aos da prospecção geofísica;
- Construir matrizes de pontos que permitem a modelação de superfícies polinomiais ou sólidos sejam representativos em termos espaciais das falhas intersectadas;
- Proceder a acertos em desvios detectados na informação de partida existente em SIG, em particular no que diz respeito à localização de alguns furos e de algumas falhas observadas.

Na Figura 3.2 apresenta-se um exemplo de interpretação 2D em que se conjugam os resultados do levantamento cartográfico de falhas com os resultados de um perfil da campanha de prospecção electromagnética realizada na área.

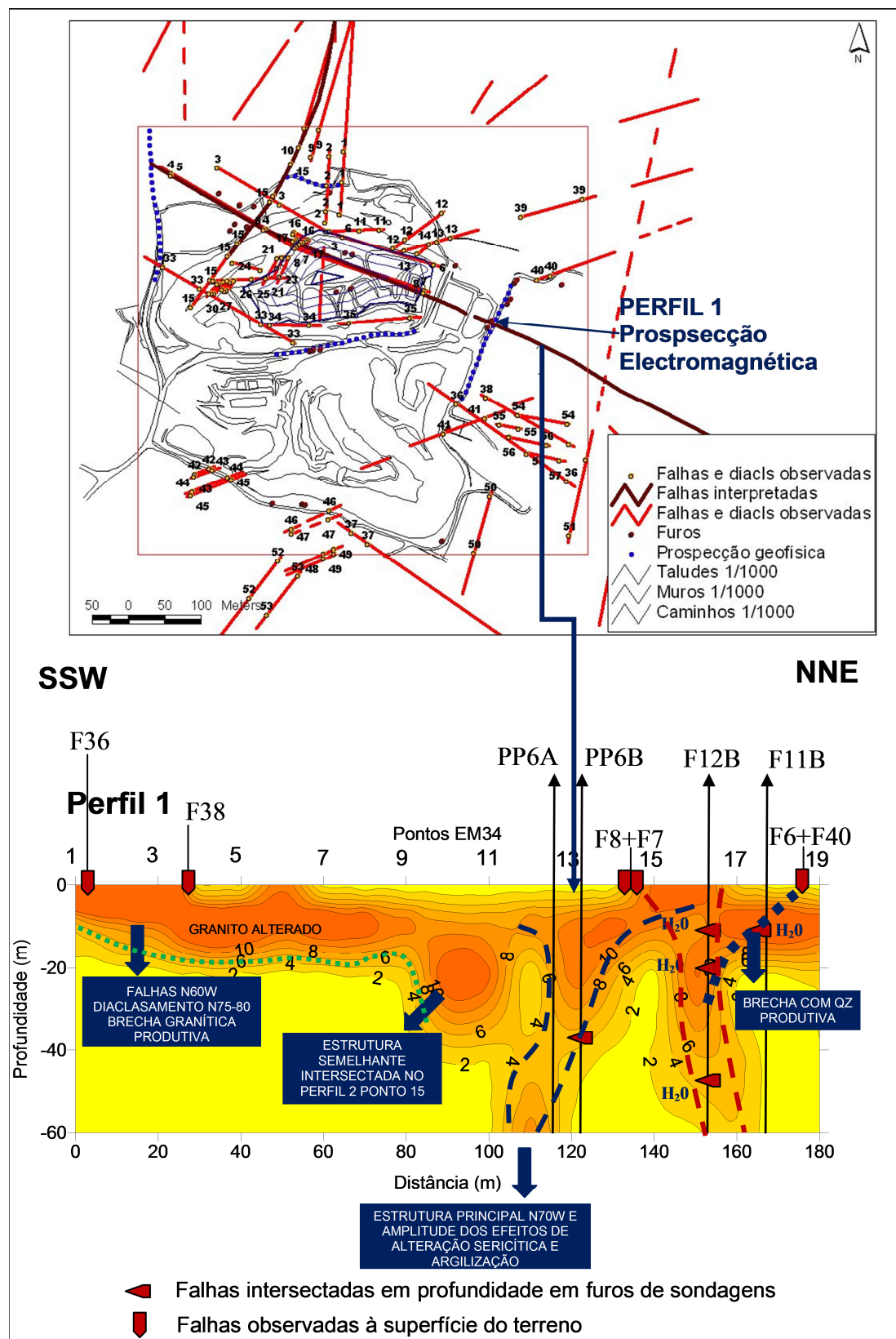


Figura 3.2. Exemplificação de interpretação conjunta realizada com recurso a resultados da campanha electromagnética (Unidades mS/m) e aos levantamentos cartográficos de falhas observadas em zonas do maciço aflorante ou exposto em taludes da corta mineira.

Esta fase prévia contemplou, assim: (1) a análise dos boletins de registo e imagens de testemunhos de sondagem e (2), para todas as situações, uma reinterpretação e compatibilização de resultados existentes. Procedeu-se, igualmente, (3) à preparação de matrizes de dados de partida devidamente coerentes, representativos da realidade do local em estudo e com um total de amostras (por propriedade analisada) considerado minimamente suficiente para as dimensões dos modelos a construir.

Nos casos em que se verificaram desvios significativos entre tipos de campanhas e de sondagens e respectivos objectivos, a reinterpretação de resultados foi efectuada recorrendo-se a (1) relação entre possíveis litologias e indicadores, em particular de natureza mineralógica, estrutural e radiométrica, (2) análise visual directa de imagens de testemunhos de sondagem e (3) análise sucessiva e repetitiva de pseudo-perfis interpretativos desenhados à mão e, posteriormente, construídos (sem modelação) com recurso ao software RockWorks v.15®.

A selecção da área de estudo teve por base a distribuição espacial das sondagens existentes e que intersectam o maciço rochoso subjacente à área mineira de Quinta do Bispo (Figura 3.3).

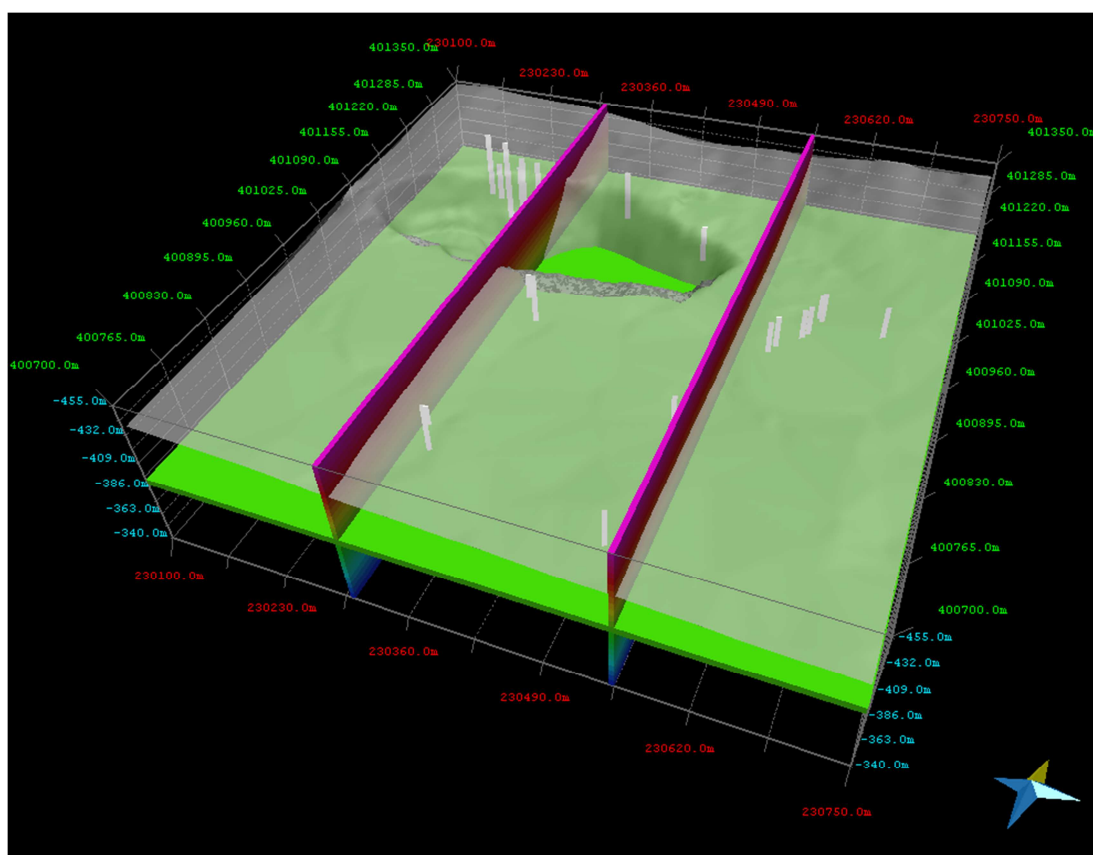


Figura 3.3. Representação 3D da área seleccionada para estudo com indicação da localização das sondagens disponíveis e seu posicionamento relativamente à corta mineira e da localização dos dois perfis em YZ e do nível em XY considerados para representação visual dos resultados de simulação obtidos das variáveis estudadas nos Capítulos 5 e 6 (visualização a partir do MOVE® 2012.1).

No desenvolvimento subsequente dos modelos 3D optou-se por considerar uma matriz composta por células cúbicas com dimensão unitária de  $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$ . A área de estudo abrange um total de 130 células segundo a direcção do eixo X, 130 células segundo a direcção do eixo Y e 23 células segundo a direcção do eixo Z o que perfaz um total de 388700 células. As coordenadas da célula de origem da GRID são  $M=230102,5$ ;  $P=400702,5$  e  $Z=342,5$ . Na Figura 3.3 são, igualmente, indicados os dois perfis no Plano YZ e o nível em profundidade no Plano XY considerados para a representação visual dos resultados obtidos por simulação das variáveis estudadas no Capítulos 5 e 6.



## 4. METODOLOGIA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS GEOESTATÍSTICOS

### 4.1 ESTADO DA ARTE

Uma das etapas mais importantes na construção de um modelo hidrogeológico num meio heterogêneo é a caracterização e compreensão da distribuição espacial das litologias e atributos relacionados, tais como a alteração e a fracturação (Almeida *et al*, 1993; Srivastava, 2005; Telles, 2006; Chambel, 2006; Almeida, 2010; Caumon *et al*, 2009; Matias, 2010).

Um modelo hidrogeológico inicia-se com a construção do chamado modelo geológico conceptual, ou seja, uma interpretação ou esboço das formações geológicas lateralmente e em profundidade. Acaba por ser uma primeira versão muito simplificada da realidade e é o primeiro instrumento de trabalho. Seguidamente, com a informação disponível das sondagens, cortes e cartografia geológica desenvolve-se um modelo das litologias (hidrofácies). Este modelo, dito morfológico, pode ser representado por superfícies do topo e base ou por um modelo de blocos onde a cada bloco é atribuída uma litologia. Se o tipo de armazenamento e fluxo subterrâneo for por porosidade, sobre o modelo geológico calculam-se propriedades hidrogeológicas equivalentes e procede-se à simulação dinâmica, se necessário, com adaptações de escala (*upscaling*). Se for por fractura, então, sobre o modelo geológico, geram-se condicionalmente malhas com a densidade de fracturação ou materializa-se uma rede de fracturas sobre a qual são estimadas propriedades equivalentes. Em todos os casos, o resultado é sempre um modelo de blocos onde são alocados os atributos hidrogeológicos por bloco (transmissividade, armazenamento), a que se segue a simulação de fluxo.

Na prática, o grau de discretização em modalidades das litologias, a dimensão dos blocos, as simplificações na consideração ou não de várias famílias de fracturas, entre outros aspectos, condicionam intuitivamente o que em parte se designa por realismo do modelo, ou seja a forma como o modelo reproduz a realidade. É evidente que um modelo por ser muito detalhado, em modalidades litológicas e resolução especial, mas ser pouco realista se a informação ou estatísticas condicionais não forem respeitadas.

Para a construção de um modelo geológico, de que se possam derivar atributos hidrogeológicos, podem ser utilizados algoritmos de modelação por objectos (determinista e estocástica), e modelos geoestatísticos (estimação e simulação). Na maior parte das vezes estes modelos utilizam-se combinados para que possam integrar toda a informação disponível conforme a resolução disponível e a variedade (cartografia geológica, sondagens, geofísica, geoquímica, ensaios de bombagem).

Numa análise extremada, um modelo hidrogeológico pode ser extremamente simples onde no limite todos os blocos da malha têm o mesmo valor médio do atributo hidrogeológico, mas também pode ser

complexo e cada bloco tem um valor diferente. Acresce ainda que se podem considerar cenários equiprováveis, ou seja, como a realidade é desconhecida é necessário materializar num conjunto de cenários a incerteza do modelo. Os cenários podem ser assim muito diferentes (elevada incerteza), moderadamente diferentes (incerteza media) ou todos iguais ou parecidos (baixa incerteza). Um bom modelo, para além de funcionar, isto é, reproduzir de forma realista a informação conhecida em todas as variantes – ensaios, dados de sondagens, etc., deve transportar a incerteza com base na variabilidade dos vários cenários gerados.

A modelação por objectos (*object based model*) é utilizada na modelação geológica para a caracterização de superfícies de topo e base que delimitam unidades e para a geração de objectos geológicos propriamente ditos, como as descontinuidades. Podem ser utilizadas estratégias de tipo determinista (desenho geológico e interpolação) e estocástica (simulação de fracturas) (Chilès *et al*, 1992; Soares e Brusco, 1997).

A modelação determinista por objectos conduz a um cenário médio, pericial, e não quantifica incerteza. A sua utilização é limitada. Já a modelação estocástica por objectos permite a geração de objectos geológicos de elevada densidade como, por exemplo, fracturas. Um modelo determinista pode servir de apoio à construção de um modelo estocástico.

Os modelos geoestatísticos são adequados para a geração de atributos contínuos e categóricos (morfologia) em malhas regulares de blocos e podem ser utilizados segundo uma estratégia de estimação e/ou simulação. Todavia, existem vantagens se estes modelos forem condicionados a informação geológica que pode ser indicada num modelo determinista.

Na descrição de sistemas aquíferos complexos, os modelos geológicos conceptuais e deterministas por si não são suficientes para representar adequadamente a estrutura interna do sistema. Estes modelos ignoram os zonamentos e heterogeneidades e não reproduzem a complexidade dos padrões de escoamento, mesmo a uma escala de pouco detalhe. Por exemplo, um sistema aquífero onde o escoamento decorra através de um sistema de fracturas, existem variáveis a quantificar, tais como densidade e orientação das fracturas que não são homogéneas.

Um sistema fracturado, como o que é objecto de estudo neste trabalho, onde coexistam lateralmente e em profundidade zonas muito fracturadas com outras pouco fracturadas, e onde a alteração funcione como zonas tampão ao escoamento, é de esperar que um modelo de transmissibilidade reproduza estas evidências gerando por simulação vários cenários equiprováveis onde em cada um se observem pequenos corpos (conjuntos de blocos) de alta transmissividade inseridos numa massa rochosa de transmissibilidade média a baixa.

Atentos a estes requisitos gerais, foi desenhada uma metodologia que se apresenta seguidamente e tem como objectivo gerar um modelo de transmissividade de um maciço granítico, caracterizado por

alteração e fracturação heterogêneas, que contacta uma antiga exploração a céu aberto de minérios de urânio. Trata-se por isso de uma zona sensível do ponto de vista ambiental onde ainda hoje se encontram depositadas escombrelas de materiais radioactivos resultantes da exploração (Pereira *et al.*, 2004; Pereira *et al.*, 2005).

## 4.2 APRESENTAÇÃO DA METODOLOGIA

Após a etapa preliminar de organização e análise da vasta informação disponível sobre o local de estudo e revisão da geologia do local, a metodologia de trabalho e a interacção com a informação de partida pode ser descrita em quatro fases principais conforme a Figura 4.1.

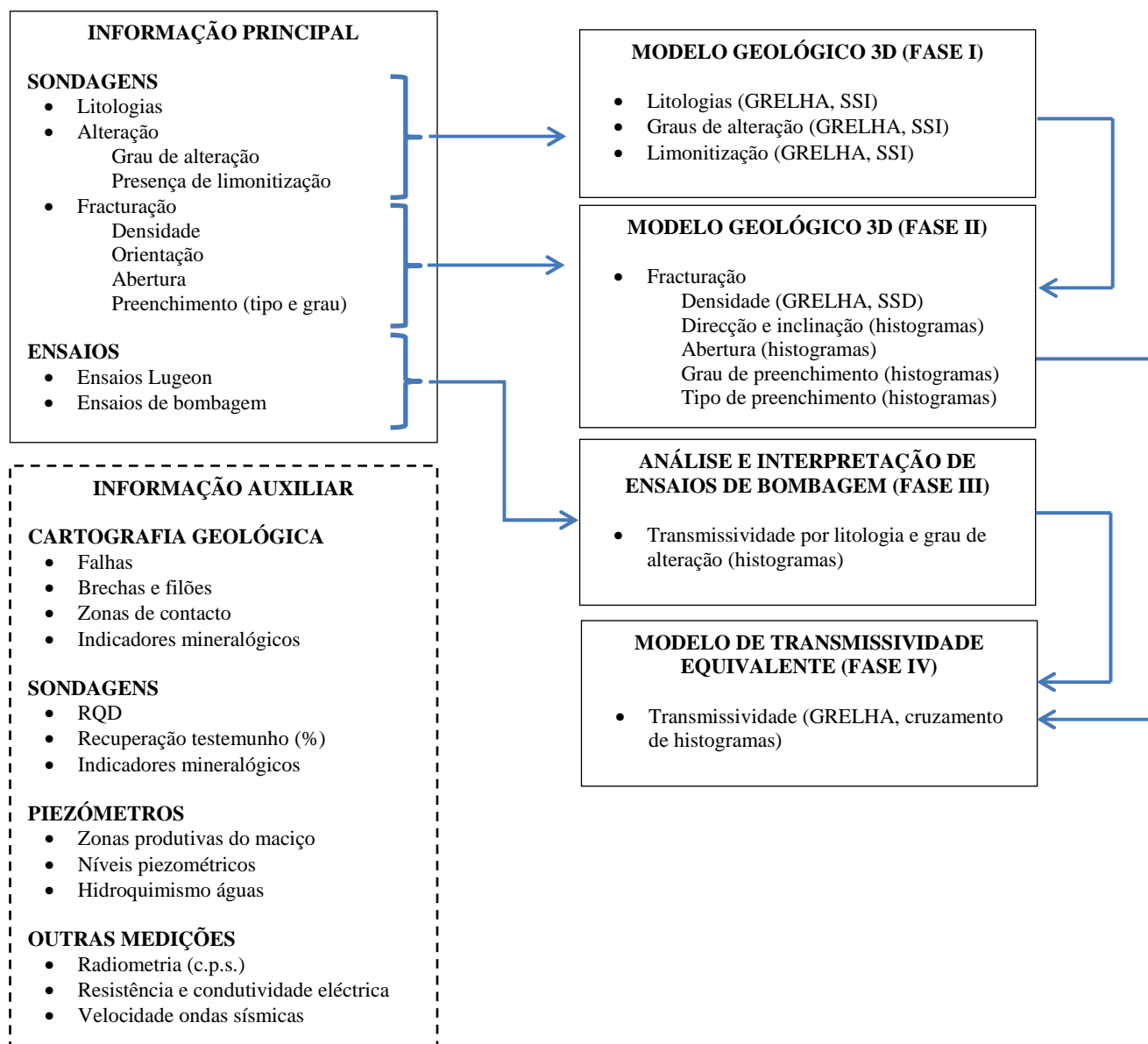


Figura 4.1. Diagrama funcional das três fases principais da metodologia proposta para este estudo no que respeita à modelação e interacção com a informação de partida.

Neste caso de estudo considerou-se preferível trabalhar com **modelos de simulação** geoestatística em detrimento de uma imagem obtida por estimação. Efectivamente, a quantidade limitada e o agrupamento da informação disponível, associada à alta heterogeneidade do maciço, resulta em elevada incerteza no conhecimento de como tais características podem variar na área estudo, quer lateralmente quer em profundidade. O maciço rochoso em estudo apresenta padrões extremos que, em termos espaciais, e por vezes de forma muito localizada, podem sofrer alterações bruscas (ex.: alternâncias de maciço “muito alterado e decomposto” com “rocha sã”; intersecções de filões de quartzo muito fracturado no seio de uma rocha sã muito pouco fracturada), tornando-se menos adequado, pois, a utilização de modelos de estimação, cujo resultado das interpolações são imagens médias e, consequentemente, atenuadas.

Com o conjunto das imagens resultantes da modelação por via da simulação, é possível, em fases posteriores, ponderar e quantificar a incerteza associada em detrimento da hipótese de construção com o recuso a uma única imagem média, atenuada, obtidas por estimação. Por exemplo, na fase de construção e calibração do modelo hidrogeológico, podem seleccionar-se as “imagens equiprováveis 3D” que melhor reproduzam as condições observadas. Será, assim, possível, posteriormente à fase de simulação dos atributos hidrogeológicos, avaliar as condições extremas resultantes de diferentes cenários equiprováveis, construídos com base nas leis de distribuição de probabilidades locais das propriedades seleccionadas e respeitando-se, simultaneamente, a variabilidade espacial do conjunto dos dados de partida.

A geração dos modelos recorreu às técnicas de simulação estocástica de variáveis de tipo indicatriz (*Litologia, Alteração e Limonitização*), de tipo contínuo (*Densidade fracturação*) e de modelação por objectos das fracturas. Estas propriedades foram seleccionadas por serem as que efectivamente influenciam o funcionamento hidrogeológico, condicionando o modo de perpetuação dos escoamentos. Tratam-se, pois, de propriedades que dizem respeito às características da matriz rochosa e das fracturas e, directa ou indirectamente, influenciam as propriedades hidráulicas do meio.

A informação de partida utilizada como condicionante dos modelos foi a obtida das sondagens e dos ensaios de bombagem. A informação indicada como auxiliar interveio na interpretação preliminar dos dados e na validação dos modelos, e pese embora não tenha sido utilizada de forma explícita, alguma dela foi muito relevante na validação e interpretação de resultados. Os dados destas quatro propriedades foram cruzados entre si, tendo-se encontrado correlações que são discutidas com mais detalhe no capítulo do caso de estudo. Estas correlações ou dependências determinaram a sequência de simulação das variáveis e a metodologia como um todo.

Os resultados dos modelos são apresentados referenciados a uma malha 3D de blocos com a dimensão unitária de 5 x 5 x 5 metros.

**Fase 1 – Construção do modelo geológico 3D das litologias, alteração e limonitização** – Compreende o pré-processamento e codificação da informação de partida relativa às litologias, alteração e limonitização, seguida de análise estatística preliminar onde se quantificam as dependências entre estes atributos. Segue-se a construção dos respectivos modelos 3D por simulação geoestatística numa malha de blocos. A Figura 4.2 detalha esta fase e a interacção entre as variáveis.

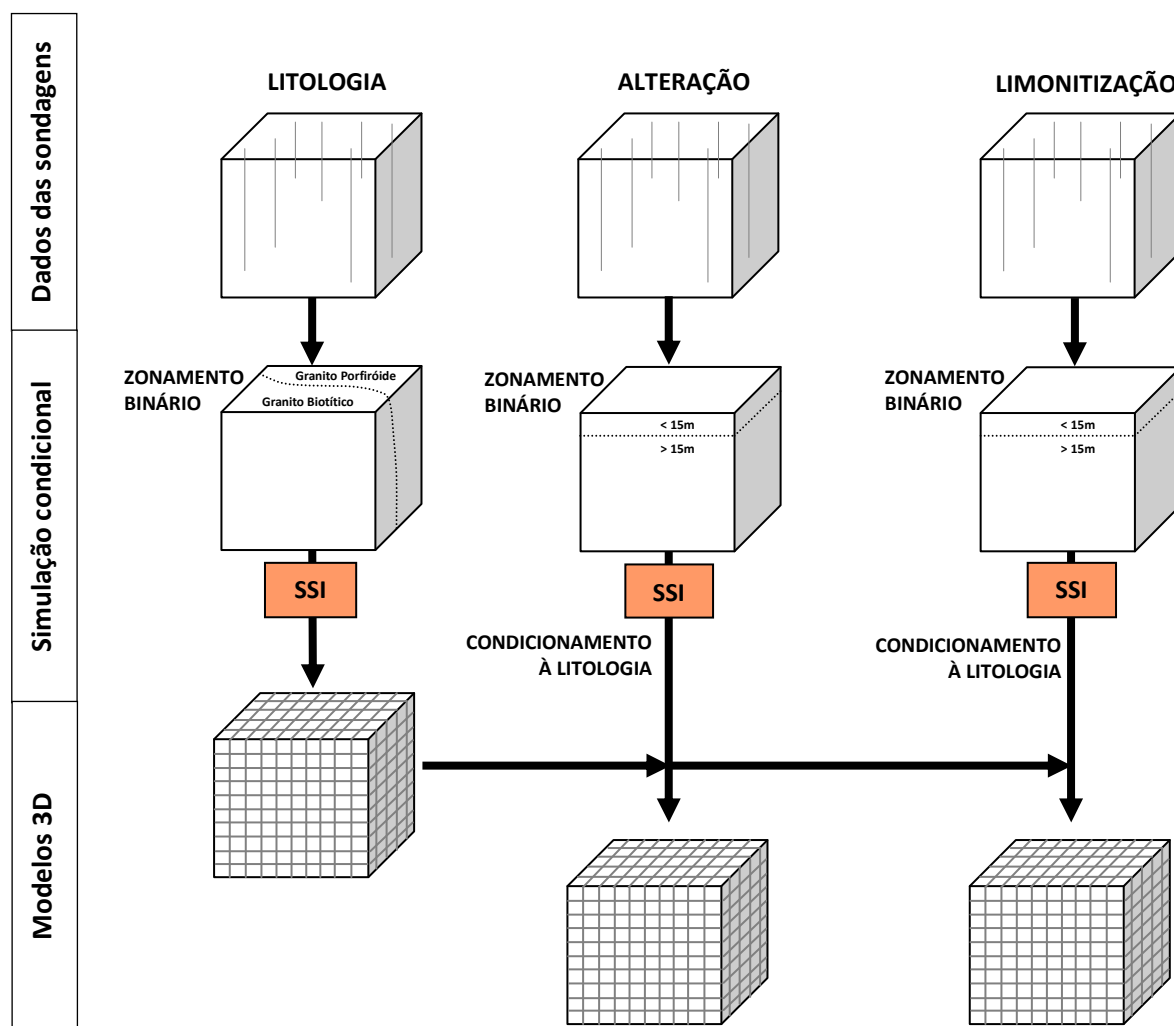


Figura 4.2. Fluxograma da fase I da metodologia proposta para a geração do modelo geológico 3D dos atributos litologia, alteração e limonitização.

- I) *Litologia* – Foi a primeira variável a ser estudada pois as restantes são dependentes. Com base nas descrições das sondagens foram encontradas 13 designações. Estas foram agrupadas, tendo sido testados 11 modelos de interpretação litológica, ou seja, de agrupamento e selecção de designações. A coerência destes modelos foi testada a vários níveis, nomeadamente, em termos de representatividade estatística, geológica e de continuidade espacial tendo-se seleccionado no

final um modelo de classificação com seis litologias. Esta classificação permitiu codificar cada testemunho de sondagem a intervalos regulares de 5 metros (dimensão dos blocos), num vector de indicatriz com seis modalidades, a que se seguiu a simulação sequencial da indicatriz (SSI), que é o algoritmo de simulação adequado para variáveis categóricas. Previamente à simulação, observou-se que as duas litologias dominantes (granito porfiróide e biotítico) ocorrem espacialmente em proporções não estacionárias, ou seja a Norte predominam os granitos porfiróides e a Sul os biotíticos, com respeito à cartografia geológica disponível do local à escala 1:5.000. Desenharam-se então no plano horizontal dois polígonos que, após estendidos para toda a vertical do volume de estudo, configuram duas regiões. Foram geradas 20 realizações de litologias.

- II) *Alteração* – A alteração é uma variável de tipo categórico com as modalidades W1, W2, W3 e W4, respectivamente do grau menos para o mais alterado. Dadas as características categóricas desta variável o algoritmo de eleição é novamente a SSI. Para esta variável tentou-se observar a sua estacionaridade, tendo-se calculado histogramas condicionais por litologia e, posteriormente, por intervalo de profundidade. Verificou-se que a profundidade discrimina o grau de alteração, assim como as litologias, pelo que a modelação da variável *Alteração* teve em conta a subdivisão do volume de estudo em 12 regiões, que resultam da combinatória das seis litologias por duas classes de profundidade (abaixo ou acima de 15 metros). Para cada uma das 20 simulações de litologias foram geradas 5 realizações de alteração, de que resultaram 100 imagens simuladas. A alteração é uma variável fundamental na estimativa dos atributos hidrogeológicos equivalentes, porque por um lado a fracturação está relacionada com as classes de alteração W1, W2 e W3 e por outro a classe W4 de máxima alteração deverá ter menor transmissividade porque os produtos da alteração diminuem a transmissividade do meio e num meio muito alterado não existe a percolação da água por fracturas.
- III) *Limonitização* – A limonitização é uma variável de tipo categórico que foi trabalhada como binária, ou seja, é observada presença ou não de limonite. Foi modelada por simulação com a SSI tendo-se procedido previamente à observação de estacionaridade. Novamente, observaram-se diferenças nos histogramas das proporções quando a presença ou não de limonitização tem em conta a litologia e a profundidade, por isso a abordagem foi igual à da variável *Alteração* tendo sido geradas também 100 realizações, 5 por cada simulação da litologia. Todavia, ao longo do estudo, e após várias análises estatísticas e periciais, apercebeu-se que esta variável não traria qualquer informação adicional no condicionamento da transmissividade equivalente e por isso não foi utilizada nas fases seguintes.

**Fase 2 – Construção do modelo geológico 3D da fracturação** – Compreende o pré-processamento e codificação da informação de partida relativa à fracturação. Segue-se a construção do respectivo modelo 3D por simulação geoestatística da variável *Número de fracturas* numa malha de blocos. A Figura 4.3 detalha esta fase e a interacção com os atributos anteriores.

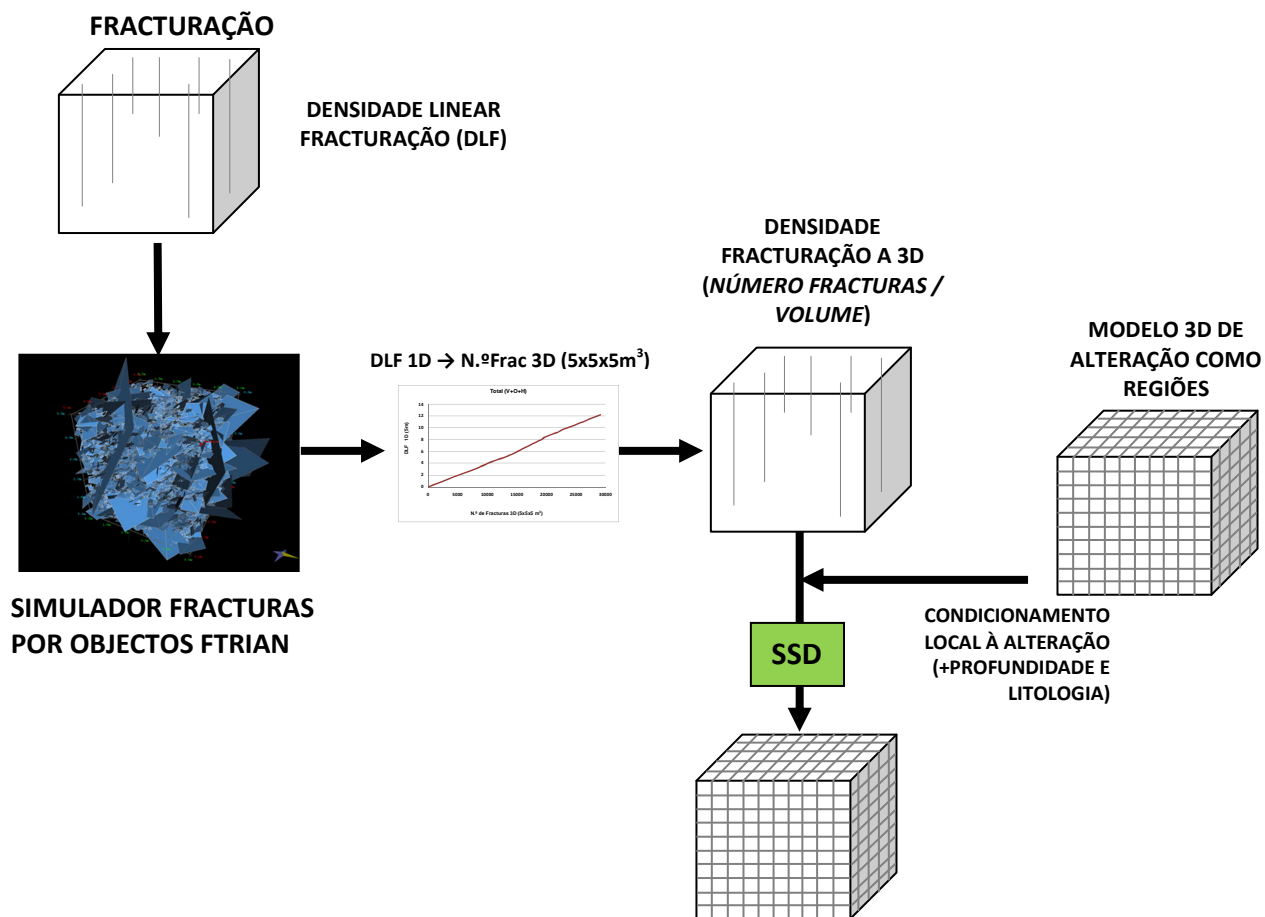


Figura 4.3. Fluxograma da fase II da metodologia proposta para a geração do modelo geológico 3D da densidade de fracturação.

Dadas as características do meio, granitos fracturados, a fracturação é o atributo mais importante na determinação dos parâmetros hidráulicos equivalentes mas também é a mais complexa. O primeiro desafio coloca-se em como modelar espacialmente esta variável, se como uma densidade linear de fracturação tal qual é medida / quantificada nos testemunhos das sondagens (índice indirecto de densidade) ou se deve ser trabalhada como um número de fracturas por unidade de volume. Acresce ainda que as fracturas ocorrem segundo várias orientações e que as sondagens são todas verticais. Neste contexto, o índice densidade linear de fracturação é pobre, porque não distingue famílias de fracturas nem toma em conta a representatividade da amostragem na relação orientação da fractura – direcção vertical da sondagem. Por exemplo, fracturas sub-verticais aparecem muito sub-amostradas em sondagens verticais enquanto que fracturas sub-horizontais aparecem bem amostradas em termos

de representatividade. Para ter em conta este aspecto da representatividade foi decidido trabalhar não com o índice densidade linear de fracturação tal qual ele pode ser medido nos testemunhos mas com um número de fracturas por unidade de volume. Para estabelecer esta relação, entre a medida 1D que é o índice densidade linear de fracturação e a medida 3D número de fracturas por unidade de volume utilizou-se um programa informático de simulação de fracturas desenvolvido no CICEGe designado por FTRIÁN (Almeida e Barbosa, 2008).

Este programa informático parte de um volume de referência no caso de estudo um bloco com 5 x 5 x 5 metros. Sucessivamente, e ao longo de várias iterações (tantas quantas as fracturas pretendidas), são posicionadas aleatoriamente fracturas dentro do volume (polígonos com a forma de quadrados) com a orientação e dimensões previamente definidas é calculado por amostragem a DLF. No final é gerada uma tabela (*lookup table*) com duas colunas: índice DLF e número de fracturas, ou seja, é feita a correspondência de 1D para 3D.

Após ter sido obtida a relação entre a DLF e o número de fracturas, as DLF calculadas nas sondagens são convertidas por interpolação linear para o número de fracturas e esta é a variável a simular na área de estudo. Esta variável é trabalhada previamente do ponto de vista da continuidade espacial e é ajustado um modelo teórico como em qualquer variável regionalizada. Como o número de fracturas é uma variável contínua utilizou-se a Simulação Sequencial Directa (SSD) (Soares, 2001; 2006). Como pretende-se que o modelo desta variável seja condicional à partição em regiões que resulta do cruzamento das litologias com o grau de alteração (e indirectamente a profundidade), utilizou-se a variante da SSD onde os resultados são condicionados a histogramas e médias locais (Roxo, 2011).

Por cada simulação da variável *Alteração* foram geradas três realizações do *Número de fracturas*, totalizando 300 realizações.

***Fase 3 – Análise e interpretação de ensaios de bombagem*** – Por via da interpretação de ensaios de bombagem foram quantificadas a transmissividade e o coeficiente de armazenamento do meio, considerando-se as características inerentes a cada ensaio de bombagem e as possíveis interpretações nas diferenças de resultados encontradas. A informação de partida determinante nesta fase foi os ensaios de permeabilidade *in situ* Lugeon e os ensaios de bombagem. Como informação auxiliar, interveniente de forma indirecta, destaca-se a variação dos níveis piezométricos e a variação na composição hidroquímica das águas em condições estacionárias e em regime transitório.



**Fase 4 – Modelo 3D de transmissividade equivalente** – Nesta fase final do estudo, cruzaram-se os resultados da interpretação dos ensaios de bombagem, expressos sob a forma de histogramas condicionais de transmissividade por litologia e por grau de alteração (W1, W2, W3 e W4), com os modelos 3D das litologias, alteração e densidade de fracturação. O resultado é um modelo de transmissividade, condicionado a toda a informação principal interveniente no estudo. A Figura 4.4 detalha esta fase e a interacção com os atributos anteriores.

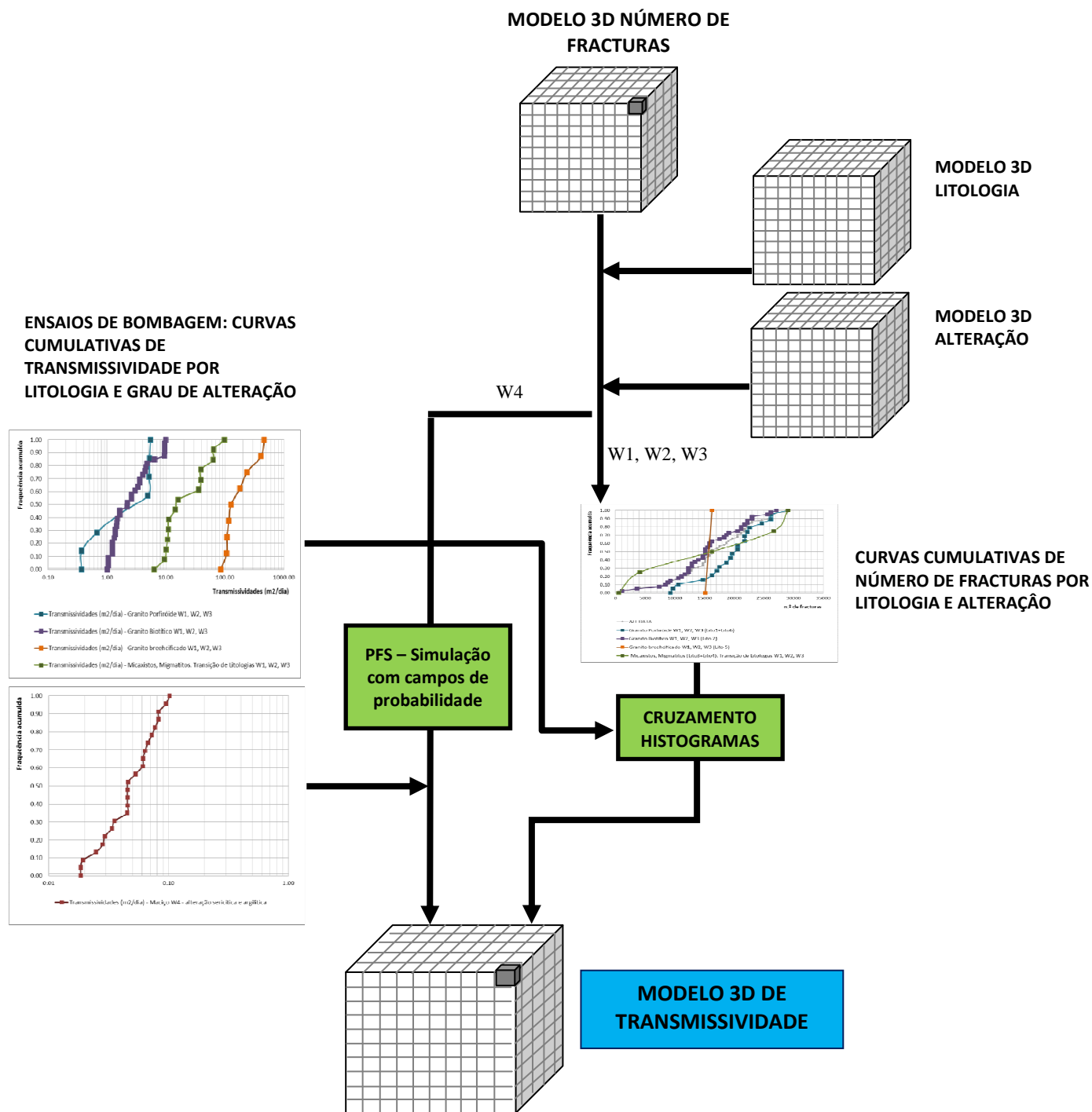


Figura 4.4. Fluxograma da fase 4 para a geração do modelo 3D de transmissividades.

As diferenças encontradas nos resultados de transmissividade resultantes das interpretações dos ensaios de bombagem relevaram que, como pressuposto de partida, na simulação das matrizes 3D da transmissividade devessem ser individualizados os troços de maciço muito alterado das demais localizações, em que o funcionamento hidráulico é fortemente condicionado pela matriz rochosa, menos alterada e, portanto, dependente das características da fracturação e das possíveis inter-relações entre os escoamentos processados nas fracturas e nos blocos da matriz.

Tal pressuposto implica necessariamente que nos modelos finais de transmissividade, os corpos representativos da “Transmissividade da Matriz Rochosa Muito Alterada – W4” e da “Transmissividade da Matriz Rochosa sã a pouco alterada W1, W2 e W3” sejam disjuntos, condição assegurada pela metodologia geoestatística seguida na simulação 3D das variáveis *Litologia*, *Alteração* e do *Número de Fracturas*.

Para os graus de alteração W1, W2 e W3, a transformação dos valores do número de fracturas simulados na Fase 2 em transmissividade equivalente, foi feita por correspondência entre os histogramas condicionais de transmissividade obtidos dos ensaios de bombagem por litologia e classe de alteração e o número de fracturas (ver procedimento experimental na Figura 4.5).

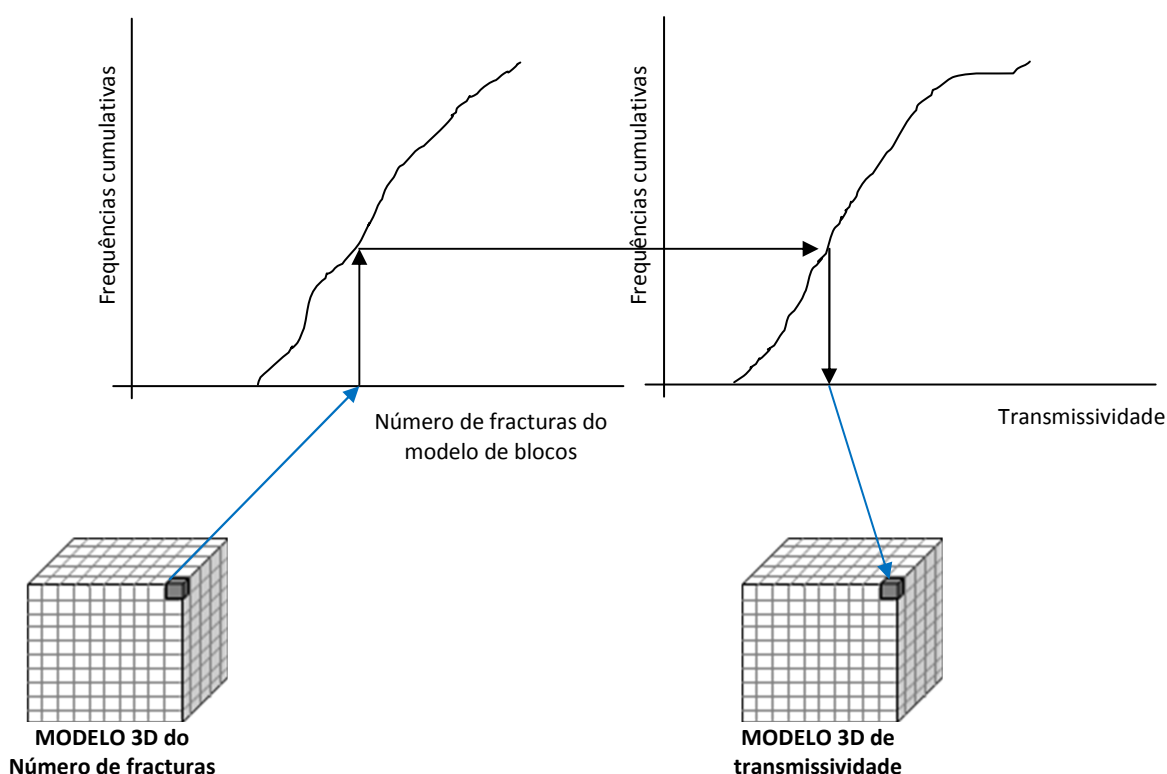


Figura 4.5. Procedimento experimental para correspondência de histogramas destinado a converter as imagens de número de fracturas em imagens de transmissividade equivalente.

A geração de transmissividade equivalente para o grau de alteração mais elevado W4 foi feita gerando valores sobre o histograma obtido nos ensaios segundo um procedimento de simulação de Monte

Carlo + Modelo de continuidade espacial que em geoestatística tem a designação de Simulação com Campos de Probabilidade (*Probability field simulation* - PFS). Este algoritmo simples e descrito sumariamente em ponto posterior permitiu gerar valores de transmissividade coerentes com um modelo de continuidade espacial que no caso em estudo foi proveniente do variograma da variável número de fracturas. Embora tenha sido sempre considerado um meio isotrópico de transmissibilidade, este algoritmo tem a vantagem de não proceder cálculos na simulação da transmissividade que é uma propriedade vectorial.

As imagens simuladas resultam do condicionamento dos valores de transmissividade obtidos deterministicamente pelos ensaios de bombagem aos histogramas das imagens simuladas da *Litologia*, de acordo com o *Número de Fracturas* que não se encontrem preenchidas (condicionamento às imagens geradas por SSD do *Número de Fracturas*) e sob um determinado grau de *Alteração*.

Ao todo foram geradas 300 cenários equiprováveis de transmissividade, uma para cada realização da densidade de fracturação, os quais que reflectem, a 3D, as heterogeneidades laterais e em profundidade que caracterizam o meio, conforme o modelo das variáveis determinantes no comportamento hidráulico do maciço que são a *Litologia*, a *Alteração* e a *Densidade de fracturação*.

### 4.3 CONCEITOS GERAIS DE GEOESTATÍSTICA

A geoestatística tem como objecto a caracterização da dispersão espacial e espaço-temporal das grandezas que definem a qualidade e a quantidade dos recursos naturais (Soares, 1999).

De entre os modelos probabilistas disponíveis, optou-se pelo “modelo das variáveis aleatórias”, em que o elemento unitário é a variável aleatória (v.a.). Neste caso, um valor localizado em  $x_i$  é interpretado como a realização  $z(x_i)$  de uma variável aleatória  $Z(x_i)$  (Soares, 2006).

O “modelo das variáveis aleatórias” não é, *a priori*, passível de ser aceite ou refutado, dado só existir uma realização de cada variável aleatória, que corresponde ao conjunto dos dados amostrados.

A um conjunto de variáveis aleatórias, relacionadas entre si dá-se o nome de função aleatória. Para se proceder à inferência dos estatísticos básicos da função aleatória é necessário admitir dois tipos de estacionaridade:

- *Estacionaridade de 1ª ordem (média)*, ou seja, admitir que todas as v.a. têm a mesma média

$$E\{z(x_1)\} = E\{z(x_2)\} = \dots E\{z(x_i)\} = m, \text{ onde}$$

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z(x_i)$$

- *Estacionaridade de 2ª ordem (variograma / covariância)*, ou seja, admitir que a correlação entre duas quaisquer variáveis aleatórias não depende da sua localização mas sim da distância  $h$  que as separa:

$$C(Z(x_1), Z(x_2)) = C(Z(x_i), Z(x_i + h)) = C(h)$$

$$\gamma(Z(x_1), Z(x_2)) = \gamma(Z(x_i), Z(x_i + h)) = \gamma(h)$$

Para se caracterizar a variabilidade espacial de um dado atributo numa determinada região do espaço não é suficiente uma mera descrição dos valores das amostras recolhidas nessa região. Neste contexto, o variograma (ou a covariância) é, por excelência, o instrumento geoestatístico privilegiado para a análise da continuidade espacial, por permitir a síntese dos parâmetros que regem a forma como a variável em estudo se dispersa no espaço. É com base nas características do variograma que se procede à determinação dos valores da variável em estudo em pontos não amostrados, *i. e.*, à estimação.

Matematicamente, o variograma corresponde à média aritmética do quadrado das diferenças de todos os pares de pontos separados de um vector  $h$ , de direcção  $\theta$  e módulo  $h$ , constituindo, assim, uma ferramenta fundamental na síntese da dispersão espacial do fenómeno ou variável em estudo. O cálculo do variograma experimental é dado pela seguinte expressão:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2,$$

onde  $(h)$  é o número de pares de pontos separados de  $h$ .

Após o cálculo do variograma experimental, procura-se ajustá-lo a uma função atenuada, de forma a sintetizar os parâmetros de continuidade espacial da variável em estudo.

Um dos principais objectivos da geoestatística é a inferência espacial, ou seja, a estimação de grandezas em locais não amostrados, com base num conjunto de valores conhecidos relativos às mesmas. Em geral, os métodos de estimação geoestatística utilizam uma combinação linear de valores conhecidos (amostrados):

$$[Z(x_0)]^* = \sum_{\alpha=1}^N \lambda_{\alpha} Z(x_{\alpha}),$$

onde  $(x_0)$  é o valor da grandeza a estimar, localizada em  $x_0$ , e  $Z(x_{\alpha})$  os valores amostrados, localizados em  $x_{\alpha}$ .

Os valores de  $\lambda_\alpha$ , os chamados ponderadores, reflectem, por um lado, a distância estrutural entre as amostras e o valor a estimar e, por outro, devem contrariar o enviesamento provocado por eventuais agrupamentos preferenciais de amostras (*clusters*).

A determinação dos valores dos ponderadores  $\lambda_\alpha$  baseia-se em dois critérios “de qualidade”, a referir:

- *Não-enviesamento*

$$E\{\varepsilon(x_0)\} = 0$$

- *Variância de estimação mínima*

$$\min E\{\varepsilon(x_0)^2\},$$

onde  $\varepsilon(x_0)$  é o erro de estimação, ou seja, a diferença entre o valor estimado  $[Z(x_0)]^*$  e o valor real  $Z(x_0)$ .

Do primeiro dos critérios resulta, assumindo a estacionaridade da função aleatória, que:

$$\sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} = 1$$

O estimador geoestatístico linear referido é denominado krigagem normal ou ordinária (*ordinary kriging*), em homenagem a D. Krige.

Note-se que o estimador é visto também como uma variável aleatória, localizada em  $x_0$ , sendo o resultado da combinação linear das  $N$  variáveis aleatórias  $Z(x_\alpha)$ .

Normalmente, não se dispõe de modelos matemáticos que permitam explicar de forma completa todos os fenómenos naturais, o que resulta no facto de à estimação estar sempre associado um determinado erro (incerteza), que se pretende minimizar.

Para que os resultados sejam verdadeiramente ajustados à realidade, torna-se necessário que o utilizador possua, na medida do possível, conhecimento das mais importantes vicissitudes relacionáveis com o fenómeno natural em causa, de modo a garantir a “coerência” dos resultados.

A principal limitação do estimador de krigagem é a atenuação da distribuição dos dados experimentais, ao actuar como um “filtro” que “aperta” os valores em torno da média. Daqui resulta que o estimador de krigagem é um bom estimador da média mas é um mau estimador da variância, o que conduz a um enviesamento da estimação dos valores extremos, com uma subestimação da proporção dos valores acima de valores de corte superiores à média e uma sobrestimação do valor da proporção dos valores abaixo de valores de corte inferiores à média (Soares, 2006).

Para contornar esta situação, recorre-se geralmente ao formalismo da indicatriz que consiste, na prática, em transformar os valores da variável original em 1 e 0, consoante determinados atributos.

No caso de estudo presente, pretende-se caracterizar espacialmente a forma de determinados atributos, expressos por corpos. Define-se corpo como sendo uma entidade localizada no espaço, disjunta e discriminada dos elementos vizinhos, por critérios qualitativos e/ou quantitativos (Soares, 1999).

A base metodológica para a determinação da forma dos corpos consiste na quantificação da probabilidade de um dado ponto pertencer a um de um conjunto de corpos disjuntos e complementares. Assim, as formas dos corpos são o resultado de uma classificação dos pontos com maior probabilidade de pertencer a cada um deles.

A ferramenta fundamental para determinação das formas dos corpos é a variável Indicatriz, designada por  $I(x)$  e definida por:

$$I(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in X \\ 0 & \text{se } x \in X^C \end{cases}, \text{ com } A = X \cup X^C$$

Neste caso, a indicatriz adquire o significado de uma variável categórica (qualitativa), não existindo relação de ordem entre  $X$  e  $X^C$ .

A continuidade espacial do conjunto de dois corpos,  $X$  e  $X^C$ , pode ser medida através do variograma ou da covariância da indicatriz, mediante os parâmetros amplitude, efeito de pepita e razões de anisotropia. Mais uma vez o variograma da indicatriz  $\gamma_I(h)$  ou a covariância  $C_I(h)$  são utilizados como medida aferidora da continuidade espacial de  $X$  e  $X^C$  em  $A$ , ou seja, constituem uma medida média da continuidade dos conjuntos dos corpos.

#### 4.4 ESTRATÉGIA E ALGORITMOS DE SIMULAÇÃO GEOESTATÍSTICA UTILIZADOS

Os modelos geoestatísticos de simulação permitem avaliar a incerteza espacial associada ao comportamento, em simultâneo, dos dados de partida. Esta avaliação é obtida por via de várias imagens equiprováveis, que em conjunto são entendidas como representativas do fenómeno espacial em estudo e incerteza (Soares, 2006; Almeida 2010; Nunes e Almeida, 2010), situação que não se verifica por via dos modelos de estimação.

Concretamente, se designarmos por  $Z_C(x)$  o conjunto de valores simulados e por  $Z(x_\alpha)$ ,  $\alpha = 1, \dots, n$ , os  $n$  valores experimentais, a imagem simulada deve cumprir as seguintes condições:

1. Para qualquer valor  $z$ :  $\text{prob}\{x_\alpha < z\} = \text{prob}\{Z_C(x) < z\}$ ;
2.  $\gamma(h) = \gamma_c(h)$ , sendo  $\gamma(h)$  e  $\gamma_c(h)$  os variogramas dos valores experimentais e dos valores simulados, respectivamente;

3. Condicionamento aos valores experimentais: em qualquer ponto experimental  $x_\alpha$ , o valor  $Z(x_\alpha)$  e o valor simulado  $Z_c(x_\alpha)$  coincidem, ou seja,  $Z(x_\alpha)=Z_c(x_\alpha)$ . Isto significa que, além de ter a mesma variabilidade, a imagem simulada passa pelos pontos experimentais, o que significa, não só, a coincidência espacial dos valores das amostras e dos valores simulados, mas também, a influência dos valores das amostras nos mapas simulados que é determinada pela maior ou menor continuidade estrutural denunciada nos modelos dos variogramas.

De acordo com Soares (2006), “...os modelos de simulação, à semelhança dos objectos da pintura dos impressionistas, mais do que reproduzir as características médias da realidade, pretendem transmitir a “impressão” resultante da variabilidade dessa mesma realidade...” sendo esta uma situação que se enquadra perfeitamente no âmbito e objectivos do trabalho.

#### 4.4.1 SIMULAÇÃO SEQUENCIAL DA INDICATRIZ

O princípio da simulação sequencial é simples e baseia-se na aplicação da relação de Bayes em passos sequenciais sucessivos (Soares, 2006).

Considere-se que se pretende simular somente dois valores,  $z_1$  e  $z_2$ . Pela relação de Bayes:

$$F(Z_1, Z_2) = F(Z_2|Z_1) \cdot F(Z_1)$$

ou seja, a simulação de  $z_1$  e  $z_2$  pode ser feita em dois passos sucessivos: primeiro, simula-se um valor  $z_1$  a partir da função de distribuição  $F(Z_1)$  e, seguidamente, simula-se o valor  $z_2$  a partir da distribuição condicional  $F(Z_2/Z_1=z_1)$ , obtendo-se, assim, o par de valores  $z_1$  e  $z_2$  das variáveis  $Z_1$  e  $Z_2$ .

Generalizando a relação de Bayes para um conjunto de variáveis  $Z_1$  a  $Z_N$ , temos:

$$F(Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N) = F(Z_1)F(Z_2/Z_1) F(Z_3/Z_1, Z_2) \dots F(Z_N/Z_1, Z_2, \dots, Z_{N-1})$$

ou seja, o conjunto de valores  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N$ , com uma lei de distribuição conjunta  $F(Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N)$  pode ser obtido por via da simulação sequencial das diferentes distribuições condicionais.

Assim, considerando uma função conjunta de  $N$  variáveis aleatórias e  $n$  dados experimentais condicionantes iniciais,  $F(N) = (Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N|(n))$ , para se obter um conjunto de valores  $z_1, \dots, z_N$  de  $F(N)$ , o processo pode resumir-se nos seguintes passos:

1. Simulação de um valor  $z_1$  a partir da função de distribuição cumulativa  $F(Z_1,|(n))$ . Uma vez simulado, o valor de  $z_1$  é então considerado como dado condicionante para os subsequentes passos de simulação, passando os dados condicionantes a  $\{n+1\}=\{n\} \cup \{z_1\}$
2. Simulação de um novo valor  $z_2$  da distribuição condicional  $F(Z_2,|(n+1))$  com base nos  $\{n+1\}$  valores condicionantes, os quais passam a ser actualizados para  $\{n+2\}=\{n+1\} \cup \{z_2\}$ .
3. Repetição do processo sequencialmente para a simulação das  $N$  variáveis.

As  $N$  variáveis aleatórias dependentes  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_N$ , podem representar uma mesma grandeza espacialmente referenciada nas  $N$  possíveis posições da malha a simular. Considerando os  $n$  valores condicionantes iniciais como sendo os valores experimentais  $Z_\alpha, \alpha=1, \dots, n$ , a função  $F(N)$  será:

$$F(N) = (Z(x_1), Z(x_2), Z(x_3), \dots, Z(x_N)|(n))$$

O ponto crucial do método de simulação sequencial reside exactamente no conhecimento das  $N$  funções de distribuição cumulativa condicionais:

$$\begin{aligned} &\text{prob}\{(x_1) < z)|(n)\} \\ &\text{prob}\{(x_2) < z)|(n+1)\} \\ &\text{prob}\{Z(x_3) < z)|(n+2)\} \\ &\quad \vdots \\ &\text{prob}\{Z(x_N) < z)|(n+N+2)\} \end{aligned}$$

A grande limitação da prática deste algoritmo de simulação sequencial reside no conhecimento destas funções (Soares, 2006) as quais podem ser estimadas com base em algoritmos geoestatísticos em que a krigagem da indicatriz deu origem à simulação sequencial da indicatriz (SSI) e a krigagem multi-Gaussiana à simulação sequencial Gaussiana (SSG). O algoritmo SSI está vocacionado para a simulação de atributos qualitativos ou quantitativos desde que apresentados por intervalos.

Genericamente, para um exemplo de uma sequência com sete amostras iniciais  $x_1, \dots, x_7$ , a aplicação do algoritmo de SSI para a geração sequencial de  $N$  variáveis aleatórias condicionadas aos dados experimentais segue-se os seguintes passos (Soares, 2006):

1. Estimação num ponto,  $x_8$ , de localização aleatória no campo  $A$ ), da lei de distribuição de probabilidades cumulativas condicionais  $F_z(z_K; x_8)|(n))^*$ , ou seja, de a probabilidade de  $Z(x_8)$  ser inferior  $z_K$  com base nos  $n$  dados condicionantes (neste caso,  $n = 7$ ), sendo tal definida por

$$F_z(z_K; x_8)|(n))^* = \text{prob}\{Z(x_8) < z_K | (n)\}^* = [I_{zk}(x_8)]^*, z_K = 1, \dots, K$$

A estimação das  $K$  classes,  $z_K = 1, \dots, K$ , da lei de distribuição  $F_z(z_K; x_8)|(n))$  tem por base o formalismo da indicatriz em que,

$$F_z(z_K; x_8)|(n))^* = [I_{zk}(x_8)]^* = \sum_{\alpha=1}^7 \lambda_\alpha I_\alpha(x_8), k = 1, \dots, K$$

Os ponderadores  $\lambda_\alpha(z_K)$  são obtidos com base nos modelos do variograma  $\gamma_i(h, z_K)$ , para cada valor de corte  $z_K$ .



2. Correção de eventuais violações da relação de ordem entre os valores estimados para diferentes valores de corte

$$F_Z(z_1; z_K)^* > F_Z(z_2; z_K)^* \quad \text{se } z_1 < z_2$$

3. Geração de um valor  $p$  compreendido entre 0 e 1, a partir de uma distribuição uniforme. O valor simulado  $Z_8(x_8)$  obtido pelo método de transformação inversa é igual a

$$Z_8(x_8) = F_Z^{-1}(z_K; (x_8); p)^*$$

O valor simulado em  $x_8$  passa a integrar o conjunto condicionante:

$$\{n + 1\} = \{n\} \cup \{Z(x_8)\}$$

Este processo sequencial torna ao ponto 1 e é repetido para um novo ponto subsequente,  $x_9$ , escolhido aleatoriamente em A) até que todos os  $N$  pontos do mapa estejam simulados.

O condicionamento aos valores experimentais surge do processo de estimação da função de distribuição cumulativa (Soares, 2006). Concretamente, o histograma cumulativo estimado de qualquer ponto, na proximidade de uma amostra, tende a reflectir predominantemente a classe a que pertence a amostra.

Garante-se, assim, teoricamente, que as imagens simuladas cumprem as duas condições requeridas para um processo de simulação: serem usados os mesmos variogramas e o histograma dos dados experimentais e ser realizada uma condicionalização dos valores simulados a estes (Soares, 2006).

No caso de não existirem valores condicionantes de início ( $n=0$ ), a SSI é não condicional a valores experimentais. Neste caso, os primeiros pontos são simulados com base na lei de distribuição global calculada a partir dos valores das amostras.

#### **4.4.2 EXTENSÃO DA SSI PARA CONJUNTOS MULTIFÁSICOS COM CORRECÇÃO DAS PROBABILIDADES LOCAIS**

Quando a variável categórica a simular exhibe várias fases, a simulação pode recorrer ao designado variograma multifásico, ou seja em vez de se utilizar um variograma por categoria utiliza-se um único variograma que resulta da soma dos variogramas individuais (Soares, 1992).

Um vector de variáveis categóricas  $I_k(x)$  do sistema multifásico pode ser expresso por:

$$\begin{cases} 1 & \text{se } x \in X_k, k = 1, \dots, K \\ 0 & \text{se } x \in X_k, \quad j \neq k \end{cases}$$

Para qualquer fase  $X_k$  podemos definir a média  $m_k = E\{I_k(x)\}$ , que é a proporção de  $X_k$  em  $A$ , podendo a continuidade espacial do conjunto  $I_k(x)$ ,  $k = 1, \dots, K$  ser medida pela covariância  $C(h)$  ou variograma multifásico  $\gamma(h)$ , ou seja:

$$C(h) = E \left\{ \sum_{k=1}^K [I_k(x)I_k(x+h)] \right\}$$

Ou

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E \left\{ \sum_{k=1}^K [I_k(x) - I_k(x+h)]^2 \right\}$$

A correcção das probabilidades locais, iteração a iteração, conforme proposto por Soares, 2006, tem a vantagem de aproximar as proporções de cada fase na imagem final ao objectivo que se pretende atingir e que pode ser global ou por regiões, principalmente nas fases menos abundantes.

O condicionamento sequencial tem o inconveniente prático de gerar dependências nos resultados entre os primeiros pontos, quando ainda existem poucos nós simulados. Efectivamente, se os primeiros nós simulados estiverem na proximidade dos valores experimentais de uma dada fase, a proporção de valores dessa fase tende a aumentar rapidamente no início e dificilmente retornará aos valores que se constituíam como objectivo. Este efeito é tanto mais significativo quanto maiores forem as amplitudes dos variogramas utilizados, afectando principalmente as classes de proporções globais mais baixas (Soares, 2006).

Considerando-se o campo de estudo  $A$ , dividido num conjunto de corpos multifásicos, disjuntos,  $X_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ , o algoritmo SIS para conjuntos multifásicos e correcção das probabilidades locais segue os passos seguintes (Soares, 2006).

1. Para um dado nó a simular  $x_1$ , na localização aleatória em  $A$ , estimação por krigagem da indicatriz do vector de probabilidades:

$$[I_k(x_1)]^* = \text{prob} \{x_1 \in X_k\}^*, \quad k = 1, \dots, K$$

Os valores estimados  $[I_k(x_1)]^*$ ,  $k = 1, \dots, K$  podem ser obtidos com base nas covariâncias individuais de cada uma das fases ou na covariância multifásica, sendo que, neste caso, só é necessária a resolução de apenas um sistema de krigagem para estimação das estruturas multifásicas.

2. Correcção de eventual violação das relações de ordem

A soma dos valores estimados de probabilidades locais tem, necessariamente, de ser unitária  $\sum_{k=1}^K [I_k(x_1)]^* = 1$ . A krigagem multifásica assegura esta relação, uma vez que utiliza um só modelo para estimar os  $K$  valores  $[I_k(x_1)]^*, k = 1, \dots, K$ .

Pode, no entanto, acontecer que os valores estimados não estejam contidos no intervalo  $[0, 1]$ , ou seja  $I_k(x_1)^* > 1$  ou  $I_k(x_1) < 0$ , devido à existência de ponderadores negativos, resultantes do processo de krigagem individual das fases ou multifásico. Nesta situação devem ser usados os métodos usuais de correcção das relações de ordem da krigagem da indicatriz.

3. Cálculo da função cumulativa em  $x_1$ :

$$[F_1(x_1)]^* = [I_1(x_1)]^*$$

$$[F_2(x_1)]^* = [I_1(x_1)]^* + [I_2(x_1)]^*$$

...

$$[F_l(x_1)]^* = \sum_{k=1}^l I_k(x_1)^*, l = 1, \dots, K$$

4. Geração de um valor  $p$  uniformemente distribuído entre 0 e 1. Então  $x_1$  pertence à fase  $k$  se  $p \in [[F_{k-1}(x_1)]^*, [F_{k1}(x_1)]^*]$ , isto é, o valor simulado em  $x_1$  passa a ser  $I_1(x_1) = 1$  e  $I_j(x_1) = 0$ , com  $j \neq k$ .
5. Os valores simulados  $I_k(x_1), k = 1, \dots, K$ , passam a integrar o conjunto condicionante de simulação.
6. A sequência de 1 a 5 é repetida até ser simulado o conjunto total de pontos em A.

Soares (2006) propõe que a correcção seja realizada condicionando-se as proporções globais (ou objectivos) de cada classe, após o cálculo do estimador de krigagem multifásica das probabilidades  $[I_k(x_1)]^*$ , conforme indicado no ponto 2.

Considerando-se  $p_k$  a proporção objectivo de uma dada fase  $K$ , um desvio  $e_K^S$  pode ser calculado entre  $p_k$  e a correspondente proporção num dado passo  $s$  de simulação,

$$e_K^S = p_k - p_K^S$$

em que  $p_K^S$  é proporção da fase  $K$  no passo de simulação  $s$

$$p_k^S = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} [I_k(x_i)]^*, k = 1, \dots, K$$

e  $N_s$  é o número de pontos estimados até ao passo  $s$ .

As probabilidades locais estimadas  $[I_k(x_i)]^*$  são corrigidas pelos desvios  $e_k^s$ ,  $k = 1, \dots, K$  do seguinte modo:

$$[I_k^s(x_1)]^* = [I_k(x_1)]^* + e_k^s, \quad k = 1, \dots, K$$

Ora, sendo os desvios nulos, ou seja,  $\sum_{i=1}^K e_k^s = 0$ , e a soma dos valores estimados igual a 1,  $\sum_{k=1}^K [I_k(x_1)]^* = 1$ , então, a soma dos valores corrigidos também será igual a 1 em qualquer passo  $s$  da simulação, ou seja:

$$\sum_{k=1}^K [I_k^s(x_1)]^* = 1$$

Com este algoritmo SSI com correcção de probabilidades locais garante-se um dos seus objectivos principais nas imagens geradas que é o da melhor reprodução das probabilidades globais de cada fase.

A SSI com correcção das probabilidades locais previamente calculadas por bi-histogramas entre as variáveis e regiões foi utilizada para gerar modelos 3D das variáveis *Litologia*, *Alteração* e *Limonitização*.

No modelo 3D da variável *Litologia* a correcção das probabilidades locais teve em conta as proporções de cada litologia por região (I - granitos porfiróides a Norte e II - granitos biotíticos a Sul). Por a litologia ser a primeira variável a simular (o resultando das restantes é-lhe dependente) e porque se observou forte efeito de agrupamento, as proporções foram obtidas pela média das probabilidades de cada litologia conforme o resultado de uma krigagem da indicatriz (desagrupamento das médias). Também, nesta variável, foram utilizados variogramas individuais em detrimento de um variograma multifásico.

Nos modelos 3D das variáveis *Alteração* e *Limonitização* a correcção das probabilidades locais teve em conta as proporções de cada classe de alteração ou limonitização por região (I – profundidade inferior a 15 metros ou II - profundidade superior a 15 metros) e por litologia de que resultaram 12 regiões. Para a *Alteração* foi utilizado um variograma multifásico e para a *Limonitização* (variável binária) o variograma simples.

#### 4.4.3 SIMULAÇÃO SEQUENCIAL DIRECTA

A SSD é um algoritmo de simulação que utiliza directamente a variável original não carecendo de qualquer transformação o que é claramente uma vantagem em relação à simulação sequencial Gaussiana (Soares, 2006).

De acordo com Soares (2006), a ideia da SSD nasceu do seguinte postulado: se as leis de distribuições locais de  $Z(x)$  são centradas no estimador de krigagem simples,

$$[z(x_0)]^* - m = \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} (z(x_{\alpha}) - m)$$

com a variância condicional local igual à variância de krigagem  $\sigma_{ks}^2(x_0)$ , então as covariâncias espaciais ou variogramas são necessariamente reproduzidos nos mapas finais simulados (Journel, 1994). O problema deste princípio é o de que as leis de distribuição locais não podem ser somente caracterizadas pelas médias e variâncias locais das variáveis originais sendo necessário assegurar a reprodução do histograma das distribuições locais  $Z(x)$ .

Para tal, a ideia associada à variante de SDD proposta por Soares, 2006 reside na utilização das médias e variâncias locais para re-amostrar a lei de distribuição global. Concretamente, são escolhidos intervalos de  $Z(x)$  da lei de distribuição global  $F_Z(x)$  para se construir uma nova função  $F'_Z(z)$  sendo os valores  $z^S(x_0)$  simulados a partir desta. Os intervalos da nova função  $F'_Z(z)$  são centrados na média local estimada por krigagem simples  $[z(x_0)]^*$  e têm uma amplitude proporcional à variância condicional local estimada pela variância de estimação da krigagem simples  $\sigma_{ks}^2(x_0)$ .

A simulação de uma variável  $Z$  em  $x_0$ ,  $z(x_0)$  por SSD pode ser explicada nas seguintes etapas:

1. Estabelecimento de um caminho aleatório que percorra uma vez todos os nós da malha a simular.
2. Na localização a simular nó  $x_0$ , , estimar por krigagem simples a média local  $z(x_0)^*$  e a variância  $\sigma_{sk}^2(x_u)$  condicional aos dados experimentais e nós vizinhos previamente simulados.
3. Definição de intervalos para a amostragem do histograma da função de distribuição global da variável a simular  $F_Z(z)$ , por exemplo, por uma transformação Gaussiana  $G([y(x_0)], \sigma_{ks}^2(x_0))$ , onde  $[y(x_0)]^* = \varphi([z(x_0)]^*)$ , e  $\varphi$  é a transformada para Gaussianos dos valores da variável de partida.
4. Geração do valor simulado  $z^S(x_0)$ :
  - a. Geração de um valor aleatório  $p$  com lei de distribuição uniforme  $U(0,1)$ ,
  - b. Geração do valor simulado  $y^S$  através da relação  $G(y(x_0)^*, \sigma_{sk}^2(x_0))$ ,
  - c. Transformação inversa para obter o valor transformado na lei de distribuição original  $z^S(x_0) = \varphi^{-1}(y^S)$  e adicionar o valor ao conjunto de informação condicionante dos restantes nós.
5. Repetir as etapas 2-5 até todos os nós serem simulados.

Se em vez de uma lei de distribuição global  $F_Z(z)$  forem conhecidas leis de distribuição locais  $F_{Z_i}(z)$ , com  $i = 1 \dots n_R$ , ou seja, por região ( $R$ ), então a simulação pode ser melhor condicionada localmente mantendo-se todo o formalismo enunciado (Roxo, 2011).

O modelo 3D da variável *Densidade de fracturação* (variável contínua) foi gerado para a área em estudo por Simulação Sequencial Directa (SSD), com condicionamento aos histogramas locais condicionais do número de fracturas por grau de *Alteração* (que inclui indirectamente a profundidade e a litologia).

#### 4.4.4 SIMULAÇÃO DE CAMPOS DE PROBABILIDADE

O algoritmo de simulação de campos de probabilidade ou *Probability Field Simulation* (PFS) tem como objectivo gerar valores de uma propriedade numa área de estudo conhecido o histograma dessa variável e o modelo de continuidade espacial (Srivastava, 1992, Froidevaux, 1993). Se não se considerar um modelo de variograma, o PFS coincide com a simulação de Monte Carlo, pelo que se pode afirmar que o PFS é um algoritmo de simulação similar ao de Monte Carlo onde é imposto um modelo de continuidade espacial quantificado por um variograma. O PFS é não condicional à informação de partida, todavia podem ser estimados erros para condicionamento posterior. Todavia, se existirem dados de partida a condicionar não há vantagem na utilização deste método por exemplo em comparação com a SSD com histogramas locais.

O funcionamento do PFS é muito simples. Em primeiro lugar é gerada uma imagem com valores de probabilidade com lei uniforme entre 0 e 1 e que exibam o modelo de continuidade pretendido. Esta malha de valores de probabilidade pode ser obtida de uma malha de valores Gaussianos simulados por SSG e transformados para probabilidade, após ordenação.

Também, em cada localização  $x_u$  a simular, é conhecida a função de distribuição cumulativa da variável  $Z$  (que pode ser igual para toda a área  $A$  ou por região)

$$F_Z(x_u) = \text{Prob}\{Z(x_u) < z\}$$

Após gerada uma malha de valores de probabilidade ( $x$ ) com lei uniforme para toda a área  $A$  e sob um modelo de variograma, o valor simulado em cada localização  $x_u$ ,  $Z_s(x_u)$  é igual a:

$$Z_s(x_u) = F_Z^{-1}(x_u, p) \text{ com } p = (x_u)$$

Para serem geradas várias imagens, no método de PFS parte-se de várias imagens de probabilidade simuladas independentemente umas das outras.

#### 4.5 SIMULADOR DE FRACTURAS POR OBJECTOS FTRIAN

A simulação 3D de fracturas segundo um modelo por objectos destina-se a caracterizar a relação entre o número de fracturas ( $N$ ), a área de fractura ( $P32$ ) e a densidade linear de fracturação ( $DLF$ ) tal qual é observada nos poços. O resultado desta relação é apresentado por uma tabela.

A maior dificuldade em estabelecer esta relação relaciona-se com as direcções das fracturas, pelo que à partida a relação entre estas variáveis é desconhecida:

$$DLF = f(N, P32, \dots) \text{ sendo } f \text{ uma função desconhecida}$$

Um modo de quantificar esta relação é utilizar uma abordagem inversa, ou seja, simular computacionalmente uma rede de fracturas aproximadas por polígonos com uma qualquer forma (Figura 4.6), amostrar o modelo por linhas de amostragem com a mesma direcção da amostragem de campo (sondagens verticais) e reportar os resultados sob a forma de tabela.

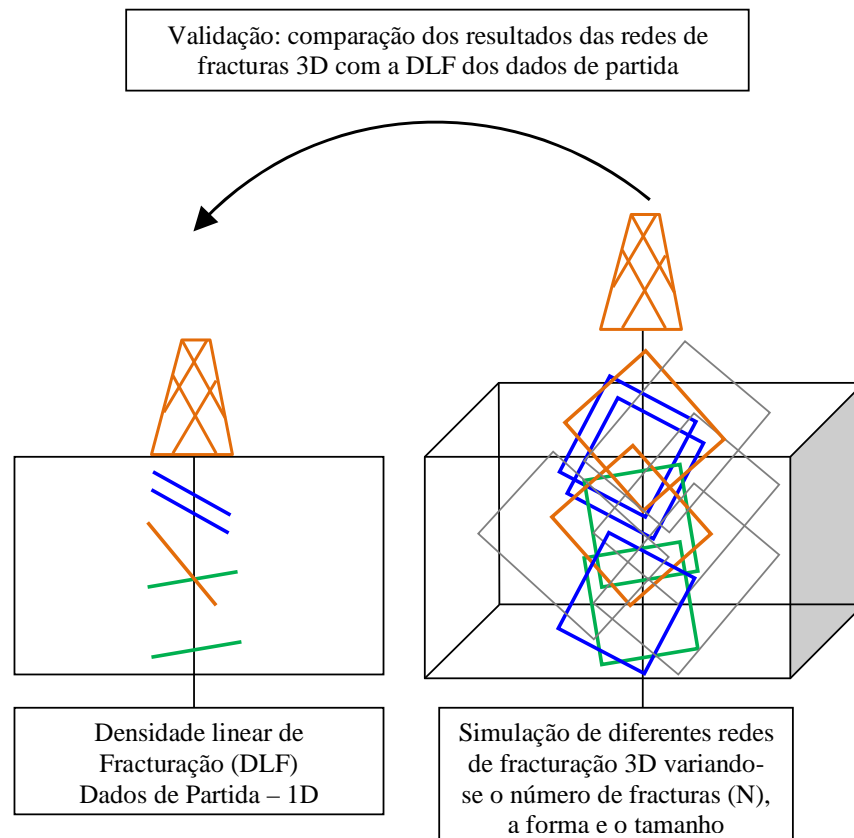


Figura 4.6. Modelo de abordagem inversa para o estabelecimento da relação entre  $N$ ,  $P32$  e  $DLF$

O CICEGe (FCT-UNL) desenvolveu um algoritmo de simulação de fracturas (FTRIAN) que permite a geração computacional de redes de fracturação aproximadas a polígonos simples (triângulos, quadrados ou malhas de triângulos) num volume de referência e condicionado a uma densidade linear de fracturação (Almeida & Barbosa, 2008). Na execução do algoritmo, as fracturas nascem em posições aleatórias de acordo com uma ou várias leis de orientação (azimutes e inclinações) segundo um procedimento de Monte Carlo. No algoritmo, a figura básica é o triângulo, e mesmo a geração de quadrados ou rectângulos é materializada no FTRIAN por dois triângulos adjacentes.

Para gerar uma fractura, o FTRIAN gera uma localização aleatória no volume de selecção. Esta localização é o centro de gravidade do triângulo, quadrado ou rectângulo que vai ser gerado como fractura. Depois, na localização gerada, é iniciado um vector com a dimensão pretendida conforme a dimensão da fractura e posiciona-se o primeiro vértice da fractura / polígono. Seguidamente são efectuadas duas rotações de  $120^\circ$  ao vector em torno do vértice central para formar um triângulo ou três rotações de  $90^\circ$  para formar um quadrado. Se as rotações forem de ângulos diferentes (dois a dois) podem ser gerados rectângulos.

Ao longo das iterações, e entenda-se que cada iteração gera uma fractura, é possível amostrar o modelo e quantificar a DLF. Se esta amostragem for sistemática a intervalos iguais o resultado é uma tabela onde se mostra a relação entre a densidade a 1D e a 3D. Porque as sondagens são verticais, as linhas de amostragem do modelo também são verticais. São sempre feitas várias e calculada a respectiva média.

Para restringir os graus de liberdade do problema, importa adicionar as seguintes assunções e/ou restrições:

- Cada bloco de referência do modelo 3D de 5 x 5 x 5 metros é homogéneo no que respeita à distribuição especial de fracturas e é considerado indivisível;
- As formas simples de tipo quadrado ou triângulo não são geologicamente realistas, todavia todas as formas utilizadas dão resultados quantitativos semelhantes pelo que o que realmente interessa nesta análise é quantificar a área projectada de fractura relativamente à orientação das linhas de amostragem e por isso a forma da fractura não é relevante. Seria sim relevante para estudos de conectividade entre fracturas.
- A lei de potência (-2) para a dimensão das fracturas é consistente com os trabalhos de Handy (1989) e Ranalli (1995), que validaram esta aproximação para várias escalas.



## **5. CASO DE ESTUDO PARTE I: MODELAÇÃO 3D DAS LITOLOGIAS, ALTERAÇÃO, LIMONITIZAÇÃO E FRACTURAÇÃO**

### **5.1 MODELO 3D DAS LITOLOGIAS**

#### **5.1.1 ANÁLISE DE MODELOS LITOLÓGICOS INTERPRETATIVOS**

A fase prévia de análise conjugada de resultados, conciliando campanhas desenvolvidas em datas distintas e sob objectivos diferenciados, não obstante a sua morosidade, veio a revelar-se fundamental ao desenvolvimento da fase subsequente, de simulação, pois permitiu a obtenção de um conjunto de dados em quantidade satisfatória das características seleccionadas para o tipo de abordagem geoestatística desenvolvida.

Neste contexto, registre-se, a título de exemplo, o caso específico da variável *Litologia* em que o tratamento e leitura directa da informação litológica, associada aos graus de *Alteração* constantes nos boletins da totalidade de sondagens analisadas, sem qualquer tipo de reinterpretação, conduziria à existência de cerca de 13 classes distintas, tendo-se vindo, posteriormente, a verificar que algumas destas são agrupáveis numa mesma e única classe. Igualmente, sem tal ponderação e reinterpretação de resultados, algumas estruturas que serão importantes na condução de escoamentos, como brechas graníticas, filões de quartzo ou áreas com efeitos de alteração distintos (e portanto, dotados de mineralogias distintas), dificilmente poderiam vir a ser modelados a 3D.

Com efeito, um dos principais problemas em termos das interpretações realizadas surgiu ao tentar-se conciliar e compatibilizar os resultados da campanha realizada em 1993 com os das demais campanhas, porque os métodos de furação são distintos. Para esta primeira campanha não existem testemunhos de sondagem, passíveis de análise e reinterpretação, em virtude da furação ser destrutiva. Em termos litológicos, as descrições sobre as fácies graníticas intersectadas são de natureza qualitativa e, no seu essencial, respeitantes a cores do granito e ao conteúdo em argilas e respectivas cores dos materiais, pulverizados, resultantes da destruição das formações intersectadas.

Daí surgiu a necessidade de se estabelecerem indicadores e “pistas” que permitiram reclassificar os resultados da campanha de 1993, sendo que, por vezes, e em particular nas interpretações respeitantes ao sector a NE e Este da corta, se tornou difícil a selecção de apenas uma classe de granitos para determinados troços, o que conduziu à necessidade de se construírem diferentes conjuntos de litologias.

Neste contexto, listam-se as equivalências adoptadas entre os resultados da campanha de 1993 e as demais campanhas:

1. Granito argiloso → Efeitos de alteração sericítica e argílica provocados por falha;
2. Granito cinzento amarelado → Efeitos de alteração sericítica em granito grosseiro de duas micas porfiróide e/ou efeitos de alteração limonítica (circulação de fluidos aquosos);
3. Granito com argilas vermelhas e altos níveis de radiometria → Intersecção com estrutura mineralizada brechificada;
4. Granito com argilas esbranquiçadas → Efeitos de alteração argílica (provável caulinição);
5. Granito avermelhado → Granito pegmatítico ( fácies félsica);
6. Granito cinza escuro → Granito pegmatítico (intercalação predominantemente biotítica);
7. Granito rosado → granito grosseiro de duas micas (porfiróide);
8. Granito cinzento → granito grosseiro de duas micas (porfiróide) ou granito de grão médio predominantemente biotítico;
9. Granito cinzento esbranquiçado → granito grosseiro de duas micas (porfiróide) ou granito de grão médio predominantemente biotítico tendencialmente mais alterado.

Relativamente às reinterpretações efectuadas sobre os resultados das demais campanhas, por observação dos testemunhos, destaca-se:

1. A regularização e compatibilização das descrições respeitantes à dimensão do grão do granito, por se ter constatado semelhanças em granitos que, em distintas campanhas, aparecem referenciados como sendo de diferentes granularidades;
2. A introdução nas classes criadas dos conceitos de “estrutura brechificada” e de “estrutura pegmatítica” (ou “granito pegmatítico”);
3. A consideração do Granito de duas micas grão médio a fino referenciado na campanha de 2005 como sendo, na realidade, equiparável a (a) área sujeita a intensa sericitização e argilização e/ou (b) área composta por granitos de duas micas de grão médio.

Com base nestas interpretações e reinterpretações foram construídas as matrizes de partida de **11** possíveis **Modelos de Organização das Litologias** (ver Tabela 5.1) sobre os quais se tecem algumas considerações.

Tabela 5.1. Classes de litologias e graus de alteração após reinterpretação dos resultados das sondagens considerados para a construção dos 11 Modelos de Organização das Litologias.

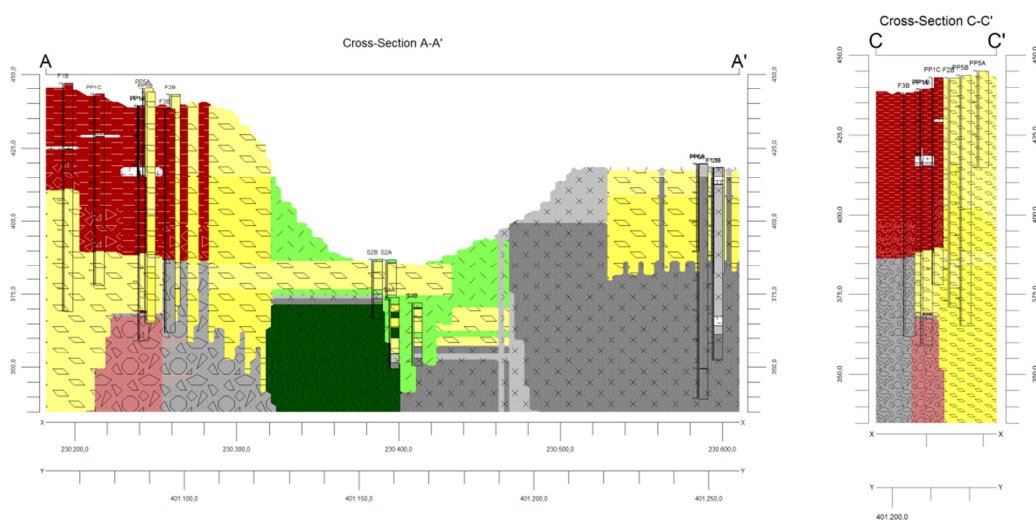
RE-CLASSIFICAÇÃO – MODELOS 1,2, e 3	RE-CLASSIFICAÇÃO – MODELOS 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11
<p>Pegmatito (ou granito pegmatítico)-alterado Pegmatito (ou granito pegmatítico)-são</p> <p>Granito porfiróide com intercalações pegmatíticas-alterado Granito porfiróide com intercalações pegmatíticas-são Granito biotítico médio a grosseiro-alterado Granito biotítico médio a grosseiro-pouco alterado a são Granito duas micas grão médio a fino-alterado Granito duas micas grão médio a fino-são Granito duas micas grão médio a grosseiro-alterado Granito duas micas grão médio a grosseiro-são</p>	<p>Pegmatito (ou granito pegmatítico) -alterado Pegmatito (ou granito pegmatítico) – são</p> <p>Brecha Granítica com argila e Qz de diversas cristalinidades, alteração sericítica intensa</p> <p>Granito grão grosseiro porfiróide com intercalações pegmatíticas - alterado Granito grão grosseiro porfiróide com intercalações pegmatíticas – são Granito grão grosseiro a médio maioritariamente biotítico - alterado Granito grão grosseiro a médio maioritariamente biotítico - pouco alterado a são</p> <p>Granito breechificado (hematite, argilas vermelhas e radiométrais altas)</p>

Em função das litologias e do posicionamento relativamente a certas estruturas que intersectam a área, foram identificados quatro sectores: Noroeste; Central; Sul e Este a Nordeste.

O **Sector Noroeste** engloba os furos F1B, F2B, F3B, F4B, PP1C, PP1A, PP1B, PP5A e PP5B (Figura 5.1). É um dos sectores mais estudado, sendo intersectado por duas importantes estruturas, uma de atitude média N70W, 75S e outra N30-35E, 85SE. Ambas têm expressão regional, sendo, igualmente, de destacar a estrutura subvertical NS, existente junto do furo F4 que se sabe ser produtiva. Em profundidade identifica-se a ocorrência de uma fácies pegmatítica, com textura grosseira, e acentuada tendência para o porfiroidismo e, em alguns casos, intercalações pegmatíticas.

As interpretações efectuadas permitem concluir sobre os efeitos de alteração acentuada que a estrutura principal N70W, 75S induz localmente, com possanças que, à superfície do terreno atingem mais de 10 metros. Esta estrutura apresenta enchimento com conteúdo argiloso, encontrando-se o maciço nas suas imediações bastante sujeito a efeitos de sericitização e argilização.

### MODELO INTERPRETATIVO 4 – BLOCO NOROESTE



### MODELO INTERPRETATIVO 8 – BLOCO NOROESTE

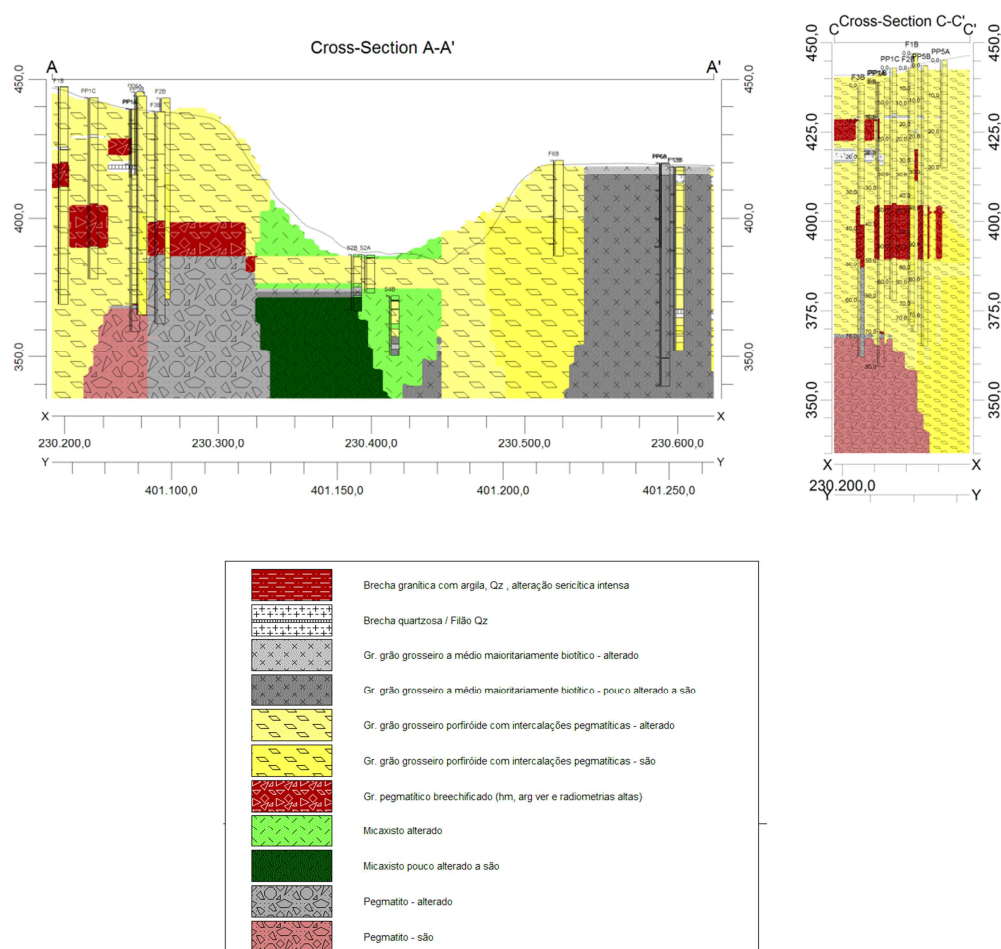


Figura 5.1. Sectores NW e Central. Visualização da matriz de dados de partida respeitantes aos Modelos 4 e 8 da Litologia, sem tratamento geoestatístico prévio.

No seio da caixa de falha desta importante estrutura, o quartzo de exsudação apresenta diversas cristalinidades e formas de ocorrência (em placas junto aos encostos ou sob a forma de filões e filonetes). Destaca-se um filão que intersecta os furos F1B, PP1A e PP2B, entre os 15 e os 25 metros de profundidade, que se encontrará brechificado e parece corresponder a uma estrutura responsável, neste local, pela circulação preferencial de água, uma vez que a sua ocorrência encontra-se sempre associada ao surgimento, igualmente, de níveis de água (zonas produtivas), sendo este um aspecto importante a reter.

Neste sector, os modelos litológicos interpretativos propostos são consentâneos entre si, variando essencialmente no que diz respeito ao modo como poderão ser modelados os efeitos de sericitização e caulínização induzidos pela estrutura N70W que, nos Modelos 4 a 7 e no Modelo 11, é considerada como “Brecha granítica com argila, quartzo e alteração sericítica intensa” (ver Figura 5.1). Esta estrutura é omitida nos Modelos 6 a 10, uma vez que se pretende explorar a solução de modelação dos seus efeitos espaciais (matriz muito alterada, argilosa, sericitizada) com recurso à sobreposição das matrizes de alteração e de falhas e fracturas.

Aspecto curioso e que importa aqui referir é o da tendência detectada das mineralizações de cálcio ocorrerem preferencialmente em planos alinhados segundo a direcção NNE-SSW, ou seja, segundo a direcção da estrutura que controla o encrave de metassedimentos.

O **Sector Central** situa-se no interior da corta e engloba os furos de sondagem S2A, S2B, S4A e S4B, os quais intersectaram a zona de contacto entre o que restará do encrave de micaxistos, explorado no passado, e o granito grosseiro de duas micas de natureza porfiróide (Figura 5.1). Este encrave, alterado por metassomatismo e de “embebição”, de matriz de composição ferrífera, acentuadamente biotítica, apresenta xistosidade com inclinação muito próxima da vertical sendo visíveis efeitos de migmatização nos granitos. De notar que todas as sondagens denotam a presença de granito de grão grosseiro de duas micas e porfiróide (Figura 5.2), sendo que nas realizadas a Sul (S4A e S4B) ocorre, igualmente, em maior profundidade, a outra fácies granítica identificada na área, de composição mais biotítica e granularidade tendencialmente média (Figura 5.3).



Figura 5.2 Sondagem S2B – 28,00 a 30,75 metros de profundidade. Contacto entre granito de duas micas profiróide intensamente alterado com os micaxistos de embebição.



Figura 5.3. Sondagem S4B – 46,40 a 49,05 metros de profundidade. Efeitos de migmatização em granito de natureza predominantemente biotítica e de granularidade média.

No **Sector Sul** encontram-se os furos F8B, F9B, F10B, PP3A, PP3B, PP4A, PP4B, a sul do enclave de micaxistos e onde ocorrem estruturas importantes, produtivas em termos hidrogeológicos, de direcção N60W e N70-75E (Figura 5.4). Tais estruturas encontram-se associadas, respectivamente, a brechas graníticas ou filões de quartzo brechificado. Com excepção da intersecção dos granitos por estas estruturas, que podem ser produtivas, este sector é relativamente regular, sendo composto pela fácies de granitos de granulometria tendencialmente média e de composição predominantemente biotítica. É de relevar a incomparavelmente menor magnitude que as estruturas brechificadas ocorrentes neste sector induzem em termos de alteração no maciço rochoso a maiores profundidades, por comparação com o que se sucede nos sectores NE e NW.



**MODELO 4 – BLOCO SUL**

**MODELO 8 – BLOCO SUL**

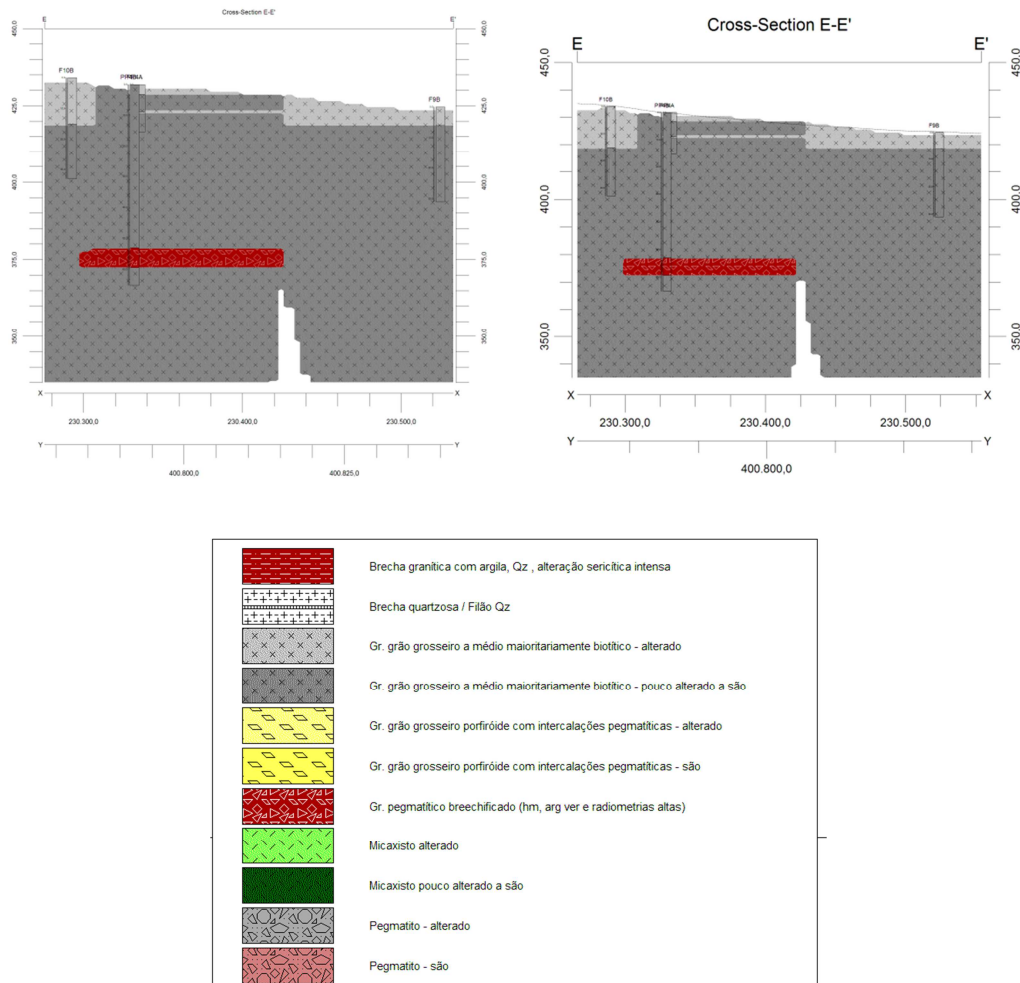


Figura 5.4. Sector Sul. Visualização da matriz de dados de partida respeitantes aos Modelos 4 e 8 da Litologia, sem tratamento geostatístico prévio.

No **Sector Este a Nordeste** é de referir a existência de dúvidas, resultantes do cruzamento de informação de distintas origens, quanto ao modo como a diferente fácies de graníticos se poderão dispor espacialmente (Figura 5.5).

## MODELO 4 – BLOCO ESTE

## MODELO 8 – BLOCO ESTE

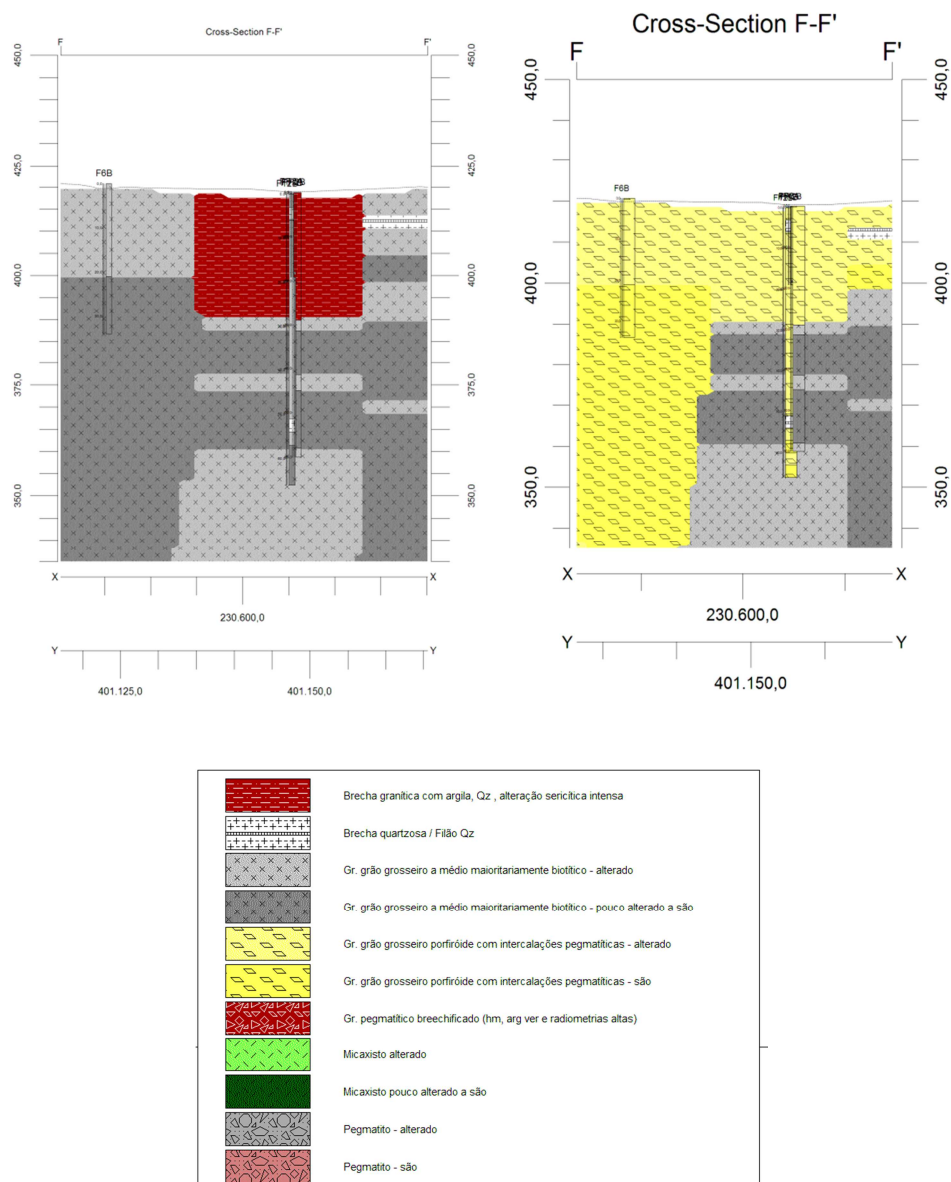


Figura 5.5. Sector Este. Visualização da matriz de dados de partida respeitantes aos Modelos 4 e 8 da Litologia, sem tratamento geoestatístico prévio.

### 5.1.2 SELECÇÃO DO MODELO LITOLÓGICO INTERPRETATIVO E AJUSTAMENTOS

Conforme já discutido, as diferenças nos modelos interpretativos devem-se, essencialmente, a dúvidas resultantes da ambiguidade da informação disponibilizada pelas sondagens destrutivas, quando cruzada com a informação das sondagens realizadas com furação e recolha de testemunhos, diferenças estas que se verificam particularmente no sector Nordeste e Este da zona em estudo e que são relativas à possível localização da fronteira entre as fácies do “Granito Biotítico” e do “Granito Porfiróide”. É de referir que esta dúvida quanto à classificação dos dados em “Granito Biotítico” ou “Granito



Porfíroide” no sector Nordeste a Este foi introduzida no Modelo seleccionado para simulação geoestatística, associando-se nas amostras originais mais duvidosas a classificação de 50% de probabilidade de ocorrência para cada uma das duas classes litológicas. A incerteza quanto a este conhecimento foi introduzida nos modelos 3D subsequentemente simulados.

Verificam-se, também, algumas diferenças que advêm de possíveis diferentes interpretações sobre algumas designações de litologias ou estruturas, de localização mais restrita ou de menor representatividade, que em algumas situações foram introduzidos nos dados de partida dos modelos, por via indirecta, interpretativa, como é o caso da possibilidade da ocorrência de filões ou zonas brechificadas de reduzida possança, por vezes, de difícil detecção e recolha no decorrer dos trabalhos de furação, particularmente nos casos em que o maciço se encontra mais fracturado e alterado (o que é exactamente este o caso), mas que poderão desempenhar um papel fundamental na perpetuação dos escoamentos facto, pelo qual, se tentou, tanto quanto possível, introduzir nos dados de partida a sua possível ocorrência, pelo menos numa fase inicial. A Figura 5.6 mostra a localização das pseudo-secções AA’ (Figura 5.7) e EE’ (Figura 5.8), consideradas para ilustrar algumas das principais diferenças possíveis atribuir aos dados de partida da litologia.

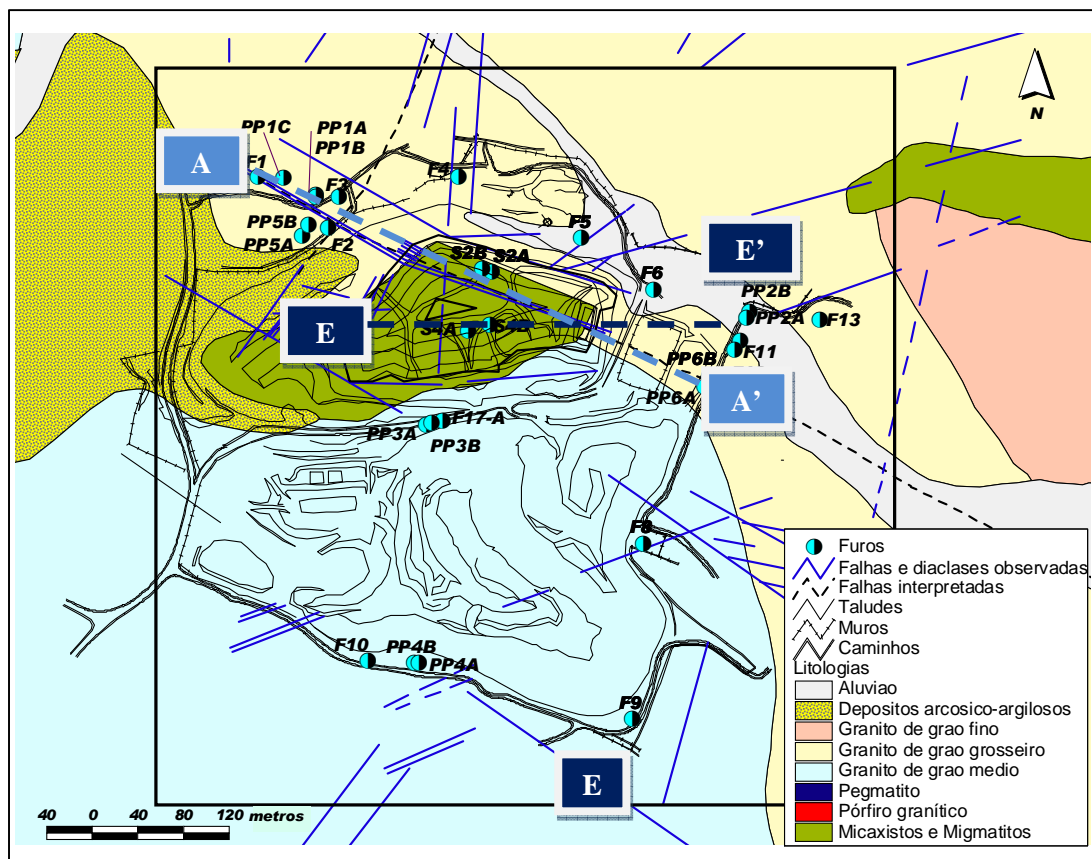


Figura 5.6. Localização das Pseudo-seções AA’ e EE’ consideradas para ilustrar algumas das principais diferenças possíveis atribuir aos dados de partida da Litologia.

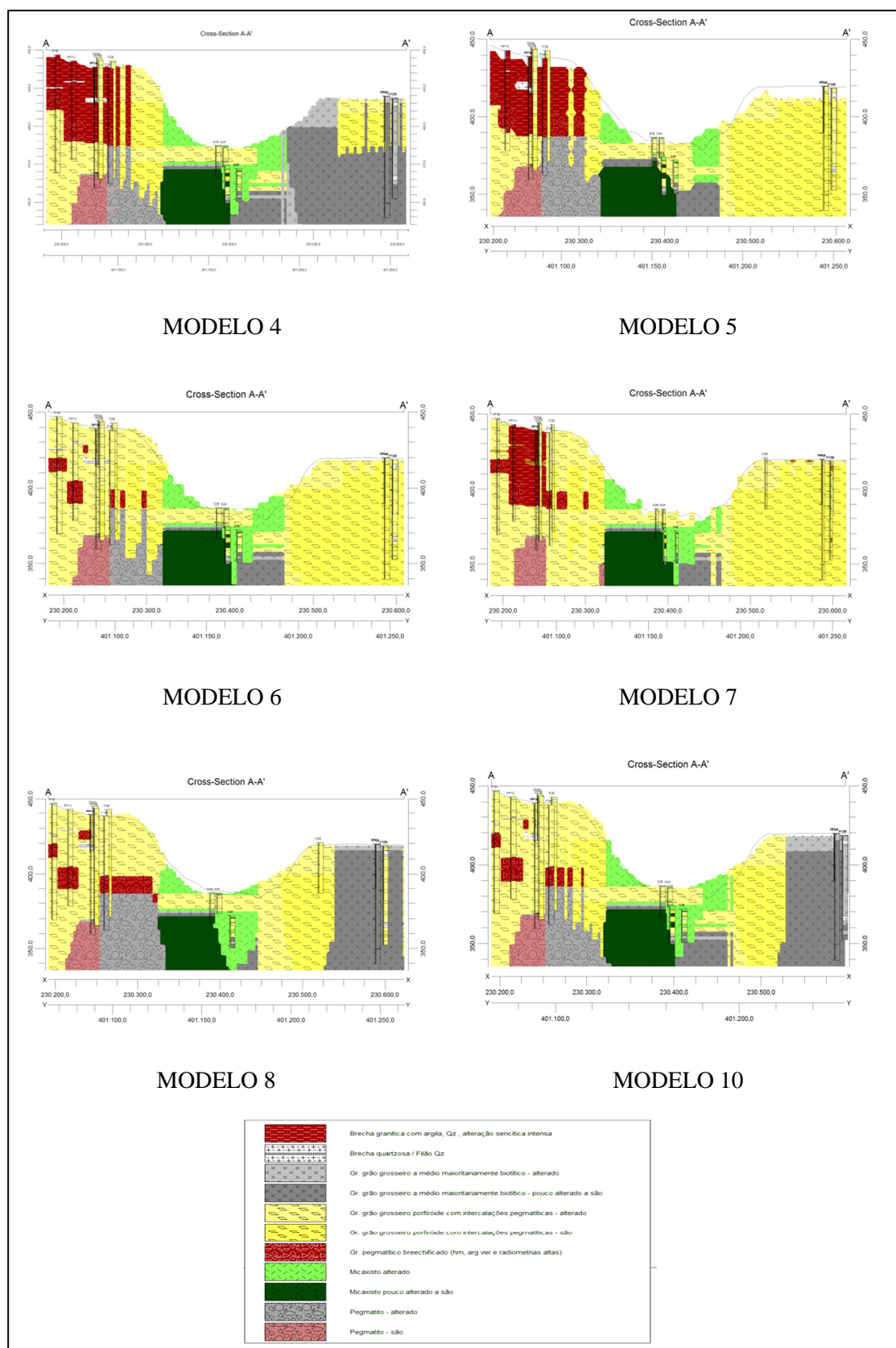


Figura 5.7. Pseudo-seções AA' de diferentes modelos litológicos interpretativos (ilustração esquemática dos dados de partida, sem processamento geoestatístico).

# CASO DE ESTUDO PARTE I: MODELAÇÃO 3D DAS LITOLOGIAS, ALTERAÇÃO, LIMONITIZAÇÃO E FRACTURAÇÃO

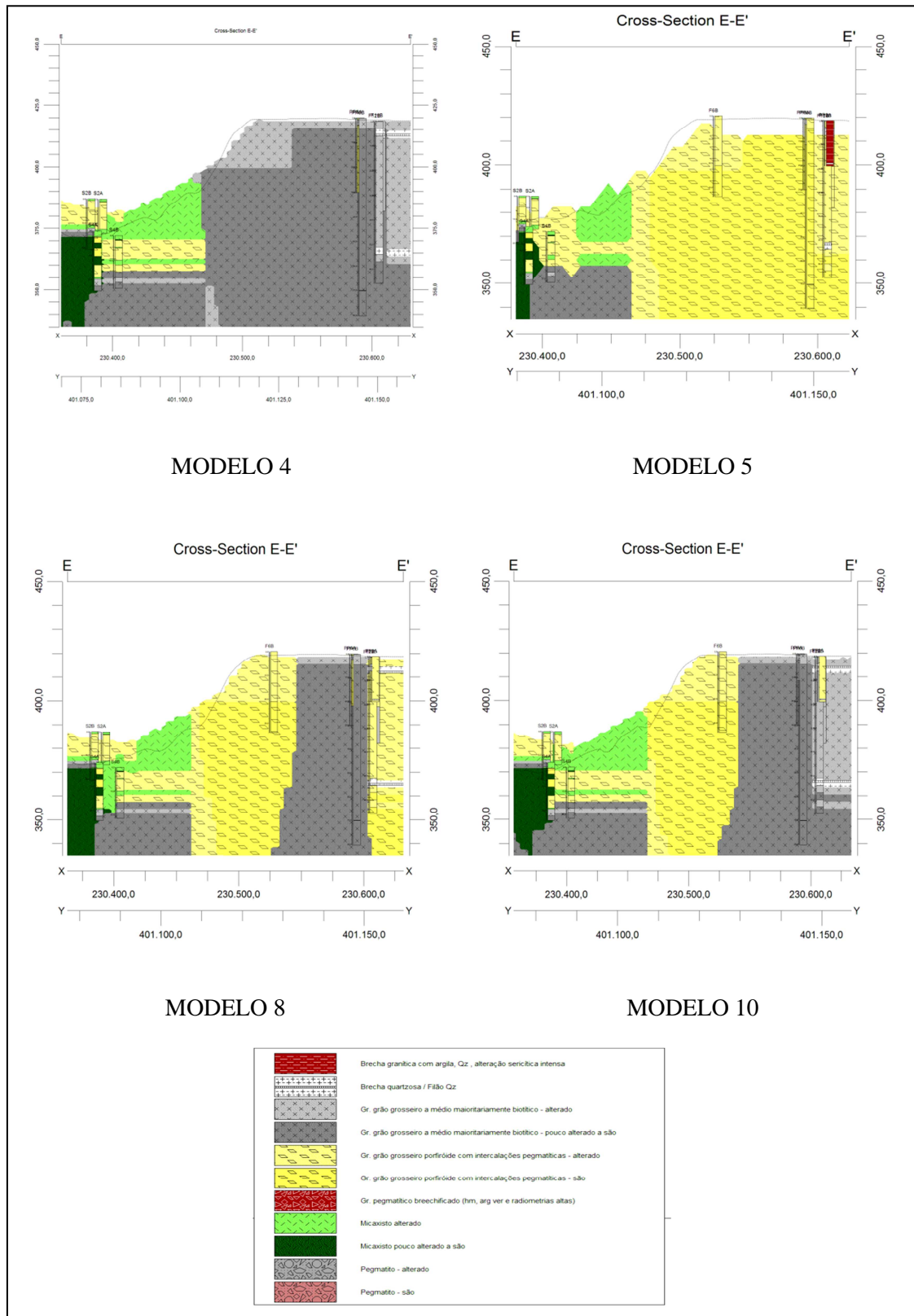


Figura 5.8. Pseudo-seções EE' de diferentes modelos litológicos interpretativos (ilustração esquemática dos dados de partida, sem processamento geoestatístico).

De entre os diferentes Modelos interpretativos estabelecidos, seleccionaram-se os Modelos 4, 5, 8 e 11 para a análise variográfica, uma vez que é entre estes que se acentuam as maiores diferenças do ponto de vista das possíveis interpretações sobre a informação originalmente disponível. A Tabela 5.2 mostra as proporções das litologias nestes modelos.

Tabela 5.2. Metragem das diferentes classes litológicas estabelecidas nos modelos interpretativos 4, 5, 8 e 11, após reanálise e interpretação dos dados de partida originais e após a respectiva regularização em suportes de 5 metros.

CLASSES		Metros de Sondagem Reconhecidos			
		MODELO 11	MODELO 4	MODELO 5	MODELO 8
0	Pegmatito	71,50	71,50	71,50	71,50
1	Granito porfiróide	560,00	375,40	740,20	803,90
2	Brecha granítica com argila	246,60	216,70	216,70	0,00
3	Granito biotítico	445,30	659,80	295,00	448,00
4	Micaxisto	14,70	14,70	14,70	14,70
5	Migmatito	9,20	9,20	9,20	9,20
6	Granito brechificado	53,70	53,70	53,70	53,70
Total (metros)		1401,00	1401,00	1401,00	1401,00

Após uma análise prévia sobre as estruturas e a continuidade especial das amostras disponíveis, seleccionou-se o **Modelo 8**, para simulação, efectuando-se alguns ajustamentos e melhoramentos sob o objectivo de se garantir uma maior estabilidade em termos estruturais, sem que se perdessem as principais diferenças em termos espaciais pretendidas garantir na imagens a simular.

Neste contexto, após algumas ponderações, e de modo a evitar a utilização de variáveis de baixa representativa estrutural ou de difícil modelação, que poderiam inclusivamente vir a propiciar maiores enviesamentos ou situações de maior “ruído” nos resultados das estimações e das simulações, considerou-se adequado proceder aos seguintes ajustamentos nos dados de partida:

1. No caso das zonas muito alteradas, de brecha granítica bastante argilizada e sericitizada (designação: “*Brecha granítica com argila e quartzo de diversas cristalinidades, alteração sericítica intensa*”), que ocorrem na dependência da estrutura que intersecta o Granito Porfiróide, uma vez que o que caracteriza estas zonas será o facto da matriz se apresentar intensamente alterada, optou-se por associar as amostras que haviam assim sido classificadas às dos “Granito Porfiróide”, isto, uma vez que esta ocorrência pode ser evidenciada nos modelos de alteração 3D.
2. Consideração do tipo “Granito Brechificado”, não obstante a conotação de natureza geológico-estrutural desta classe, em virtude da importância que a mesma pode representar na perpetuação de escoamentos subterrâneos na área dos “Granitos Biotíticos”, a maiores

profundidades, optando-se, por a considerar individualizada nos modelos litológicos a construir já que foi possível detectar, da análise variográfica, uma possível estrutura nos dados;

3. Em virtude do reduzido número e localização das amostras e, consequentemente, por não ter sido possível detectar uma estrutura razoável em termos variográficos dos filões de quartzo (designação: “*Brecha ou filões com quartzo*”) que ocorrem na área em estudo, optou-se por retirar esta classe, tendo a localização das amostras sido cruzada com os dados respeitantes à fracturação de modo a que a informação respeitante a estes filões, que podem constituir caminhos preferenciais aos escoamentos, pudessem ser introduzidos e considerados nos modelos 3D de fracturação.
4. Introduzir a incerteza quanto ao conhecimento na classificação de algumas amostras em “Granito Biotítico” ou “Granito Porfíróide” no sector Nordeste a Este associando-se a estas a classificação de 50% de probabilidade de ocorrência para cada uma das duas classes litológicas.

Após a selecção, e uma vez realizados os ajustamentos indicados ao modelo interpretativo, os dados de partida foram regularizados para os suportes de dimensão 5 metros, compatíveis com a dimensão unitária de  $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$  dos blocos no modelo dos atributos geológicos.

Refira-se que a variável *Litologia* constitui-se como uma variável categórica, não dicotómica, por serem comuns as situações em que um suporte de 5 metros contém mais de uma litologia. Assim, cada amostra, tem um valor entre 0%(0) e 100%(1), indicador da proporção de cada uma das classes do suporte.

Seguindo de perto a análise variográfica previamente efectuada e a lógica a desenvolver em todo o trabalho, os dados de partida do Modelo 8 foram classificados em **seis classes litológicas**, constituindo-se, assim, a *Litologia* uma variável categórica multifásica composta por:

- *Fase 1* – “Granito de grão médio a grosseiro, porfíróide, por vezes com intercalações pegmatíticas” designado de ora em diante como **Granito porfíróide**;
- *Fase 2* – “Granito de grão grosseiro a médio a fino, maioritariamente biotítico”, designado de ora em diante como **Granito biotítico**;
- *Fase 3* – **Micaxistos** - fácies de xistos compostos por mica biotítica, por vezes, bastante ferríferos, ocorrentes no encrave de metassedimentos remanescente da exploração mineira;
- *Fase 4* – **Migmatitos** - fácies de transição entre os granitos e os micaxistos, enriquecidos em mica biotítica, por vezes, bastante ferríferos, ocorrentes no encrave de metassedimentos remanescente da exploração mineira;
- *Fase 5* – **Granito breechificado** – apesar da conotação de natureza estrutural desta fase, dada a importância que a mesma pode representar na perpetuação de escoamentos subterrâneos, a

maiores profundidades, optou-se, ainda assim, por a considerar individualizada nos modelos litológicos simulados;

- Fase 6 – **Pegmatito** – em representação dos níveis de “Granito Pegmatítico”, localizados em profundidade, a Noroeste da área em estudo evidenciando a existência de estrutura (ou estruturas) na área, situação que regionalmente é muito típica;

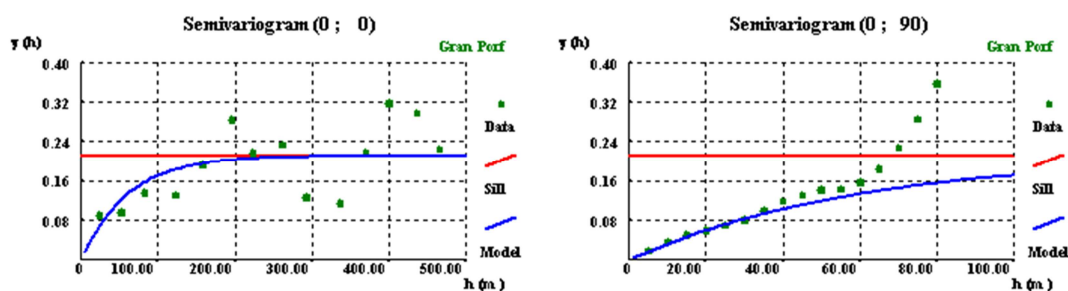
A Tabela 5.3 apresenta as proporções das seis litologias consideradas para modelação.

Tabela 5.3. Metragem das diferentes classes litológicas consideradas modelo interpretativo seleccionado – Modelo 8 - após reanálise e interpretação dos dados de partida originais e após a respectiva regularização em suportes de 5 metros.

CLASSES		Metros de sondagem reconhecidos no modelo interpretativo seleccionado (MODELO 8)
1	Granito Porfíróide	803,90
2	Granito Biotítico	448,00
3	Micaxisto	14,70
4	Migmatito	9,20
5	Granito brechificado	53,70
6	Pegmatito	71,50
TOTAL (metros)		1401,00

### 5.1.3 ESTRUTURA E CONTINUIDADE ESPACIAL DOS DADOS EXPERIMENTAIS

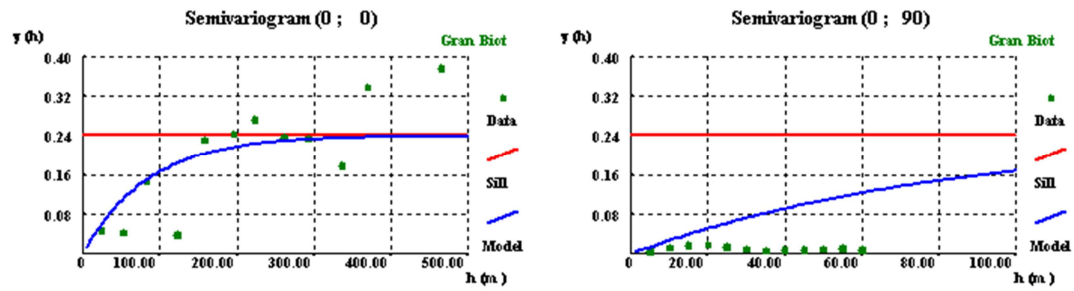
Após o tratamento prévio da variável *Litologia*, procedeu-se à análise da continuidade das 6 modalidades. Foram calculados variogramas para as direcções horizontal XY com passo de 35 metros e vertical Z com passo de 5 metros. Os resultados podem ser observados nas Figura 5.9 a Figura 5.14.



(Modelo: exponencial;  $C=0,211$ ;  $a_V=a_H=180$  metros, isotrópico)

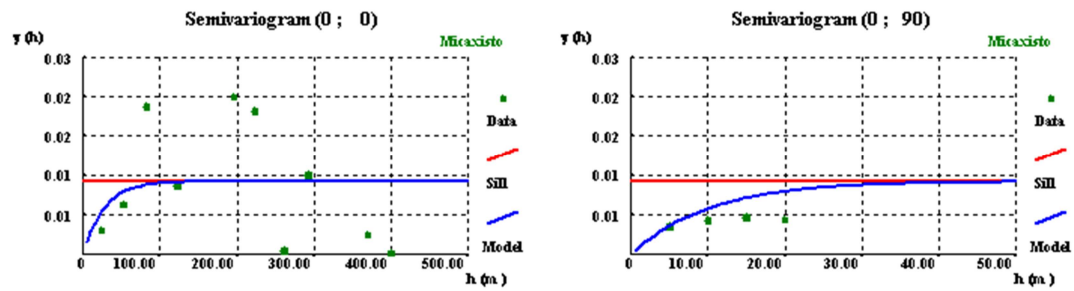
Figura 5.9. Variogramas experimentais da litologia Granito Porfíróide e modelo teórico ajustado.





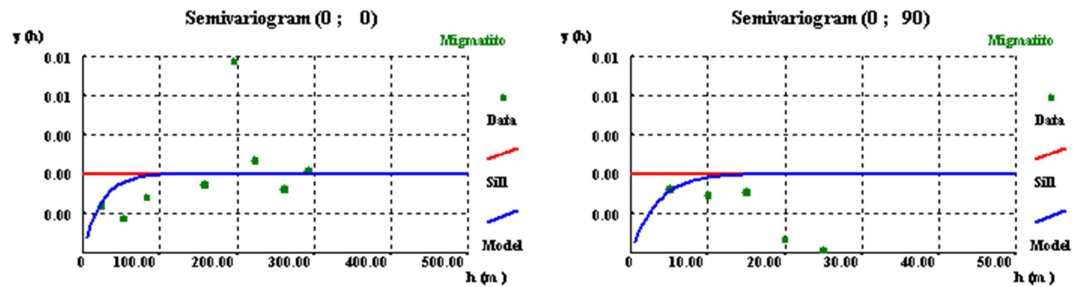
(Modelo: exponencial;  $C=0,24$ ;  $a_v=a_H=250m$ , isótopo)

Figura 5.10. Variogramas experimentais da litologia Granito Biotítico e modelo teórico ajustado.



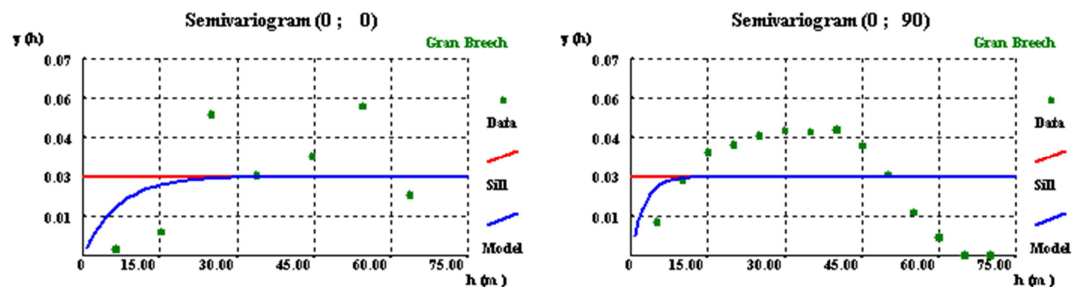
(Modelo: exponencial;  $C=0,011$ ;  $a_H=80m$ ;  $a_v=30 m$ ;  $r_a=2,6$ )

Figura 5.11. Variogramas experimentais da litologia Micaxisto e modelo teórico ajustado.



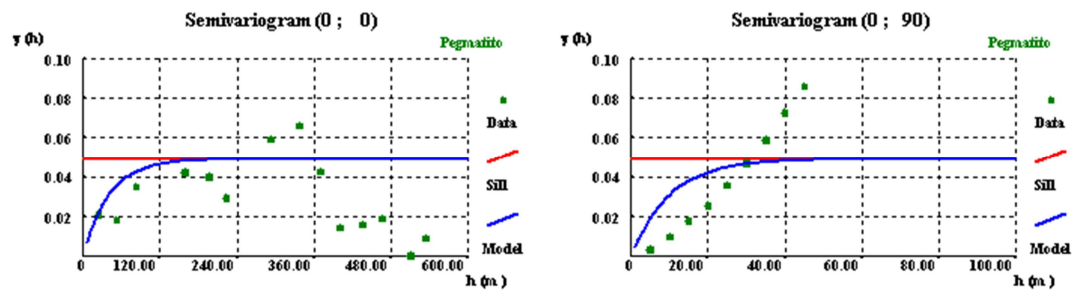
(Modelo: exponencial;  $C=0,003$ ;  $a_H=70m$ ;  $a_v=10 m$ ;  $r_a=7$ )

Figura 5.12. Variogramas experimentais da litologia Migmatito e modelo teórico ajustado.



(Modelo: exponencial;  $C=0,028$ ;  $a_H=20m$ ;  $a_v=7,5 m$ ;  $r_a=2,6$ )

Figura 5.13. Variogramas experimentais da litologia Granito Brechificado e modelo teórico ajustado.



(Modelo: exponencial;  $C=0,049$ ;  $a_H=120m$ ;  $a_V=30m$ ;  $r_a=4$ )

Figura 5.14. Variogramas experimentais da fase Pegmatito e modelo teórico ajustado.

#### 5.1.4 SIMULAÇÃO 3D DAS LITOLOGIAS

De modo a garantir nas imagens a simular uma maior continuidade espacial das duas classes litológicas dominantes - *Granito Porfiróide* e *Granito Biotítico* – respeitando-se, tanto quanto possível, a localização da fronteira existente entre estas duas litologias conforme definido na cartografia existente à escala 1:5.000, considerou-se, desde logo, na fase de experimentação e de exploração dos dados, condicionar as estimações e simulações subsequentes às duas regiões, disjuntas, das fases *Granito Porfiróide* e *Granito Biotítico* (Figura 5.15).

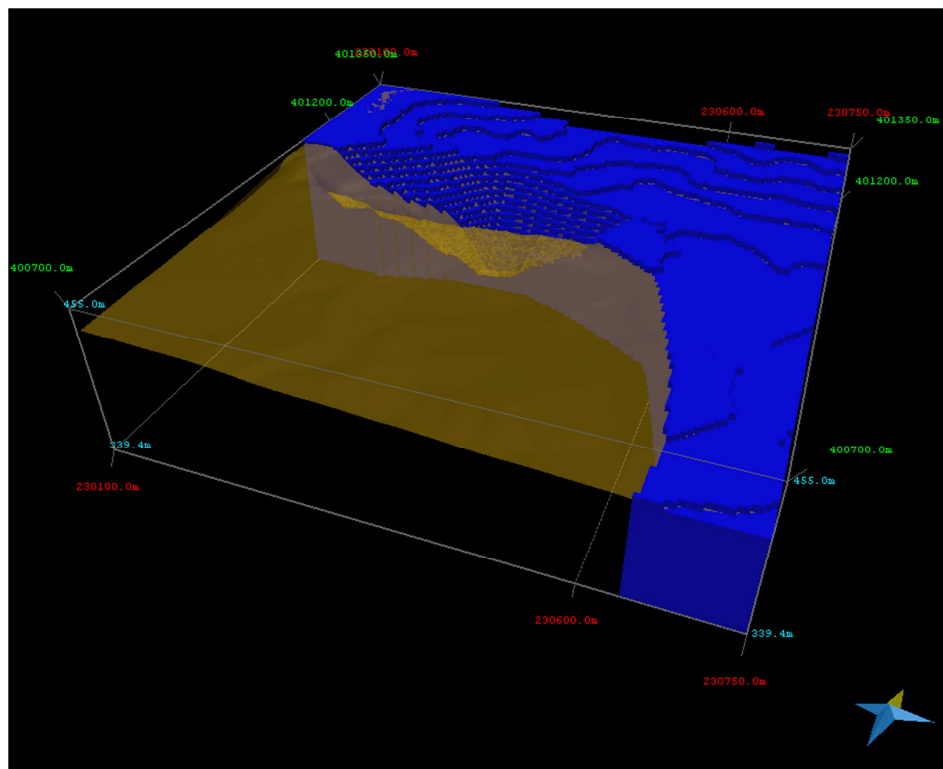


Figura 5.15. Visualização 3D das regiões estabelecidas para as fases Granito Porfiróide e Granito Biotítico com base na cartografia litológica à escala 1:5.000, consideradas para posterior condicionamento dos resultados de simulação (MOVE® 2012.1).



Os modelos 3D da variável *Litologia* foram desenvolvidos com o algoritmo SIS com correcção das probabilidades locais (Soares, 2006). Dadas as diferenças encontradas entre as amplitudes dos variogramas não foi utilizado o modelo multifásico que é uma simplificação razoável apenas se as amplitudes forem semelhantes. A simulação foi condicionada às proporções obtidas para as 6 litologias após krigagem da indicatriz dos dados experimentais para desagrupamento. Os resultados deste procedimento estão na Tabela 5.4, por zona (Sul e Norte).

Tabela 5.4. Proporções globais de cada litologia dos dados experimentais e dos obtidos por krigagem da indicatriz sem e com condicionamento às duas regiões Z1 e Z2, respectivamente granito biotítico e granito porfiróide.

Litologia	Frequências			
	Dados experimentais	Krigagem da Indicatriz	Z1 (Sul) Granito Biotítico	Z2 (Norte) Granito Porfiróide
Granito Porfiróide	0,5045	0,3488	0,1920	0,5015
Granito Biotítico	0,3949	0,5679	0,7467	0,3935
Micaxisto	0,0099	0,0144	0,0160	0,0129
Migmatito	0,0062	0,0074	0,0128	0,0021
Granito brechificado	0,0363	0,0269	0,0289	0,0250
Pegmatito	0,0483	0,0346	0,0035	0,0649
TOTAL	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Número de Células do Modelo	
Z1 (Sul) "Granito Biotítico"	Z2 (Norte) "Granito Porfiróide"
200698	188002
Total: 388700	

Os resultados confirmam a existência de agrupamentos da amostragem porque na maior parte dos casos existem diferenças entre as proporções iniciais e as desagrupadas. Nas litologias dominantes, Granito Porfiróide e Granito Biotítico, com mais de 90% do total, este efeito é mesmo muito significativo. O cálculo das proporções por região também só por si recomendaria o desagrupamento. Aqui observa-se, como esperado, forte predominância do Granito Biotítico a Sul e do Granito Porfiróide a Norte.

Foram gerados 20 cenários equiprováveis das litologias. Na Figura 5.16 mostram-se imagens de um nível de duas realizações e a imagem média e nas Figura 5.17 e Figura 5.18 apresentam-se três perfis das mesmas realizações e, igualmente, a imagem média. Na Figura 5.25 constam, a título ilustrativo, duas visualizações a 3D de uma realização.

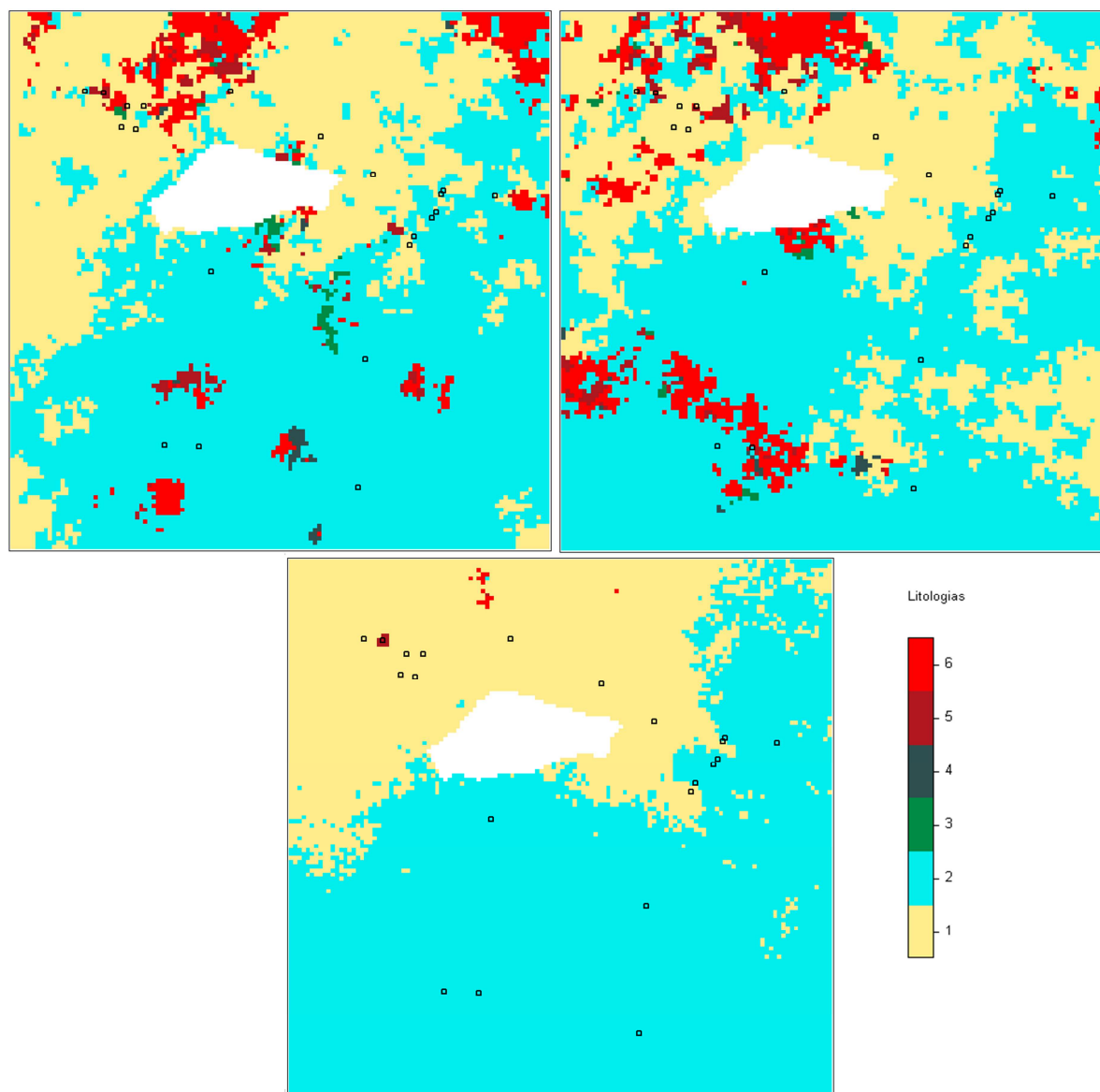


Figura 5.16. Duas imagens simuladas equiprováveis das litologias e imagem média das 20 realizações: (1) Granito porfiróide; (2) Granito biotítico (3) Micaxistos; (4) Migmatitos (5) Granito brechificado (6) Pegmatito. (Plano XY, Z=387,5m).

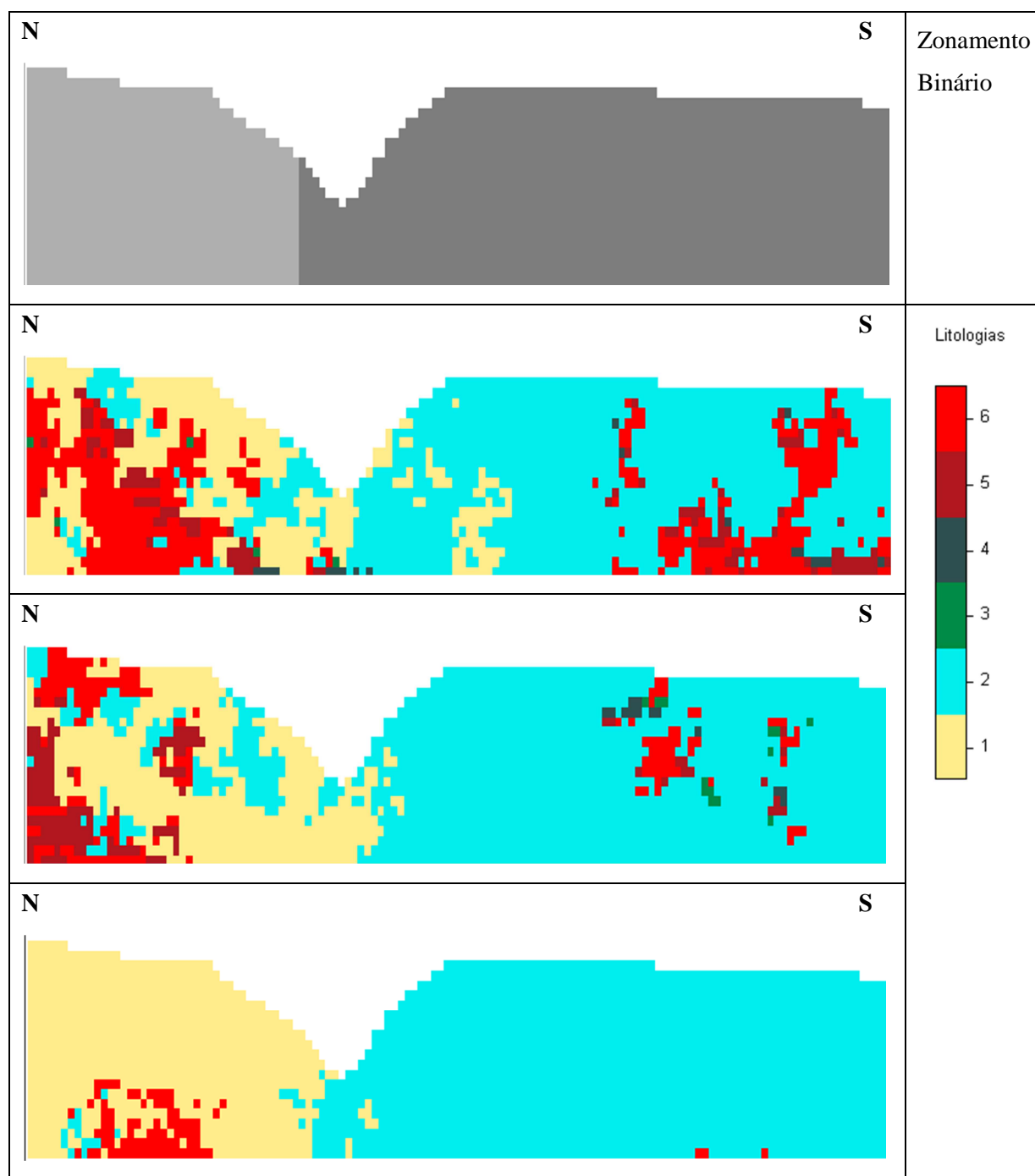


Figura 5.17. Zonamento binário, duas imagens simuladas equiprováveis e imagem média das das 20 realizações das litologias: (1) Granito porfiróide; (2) Granito biotítico (3) Micaxistos; (4) Migmatitos (5) Granito brechificado (6) Pegmatito. (Plano YZ, X=230300m).

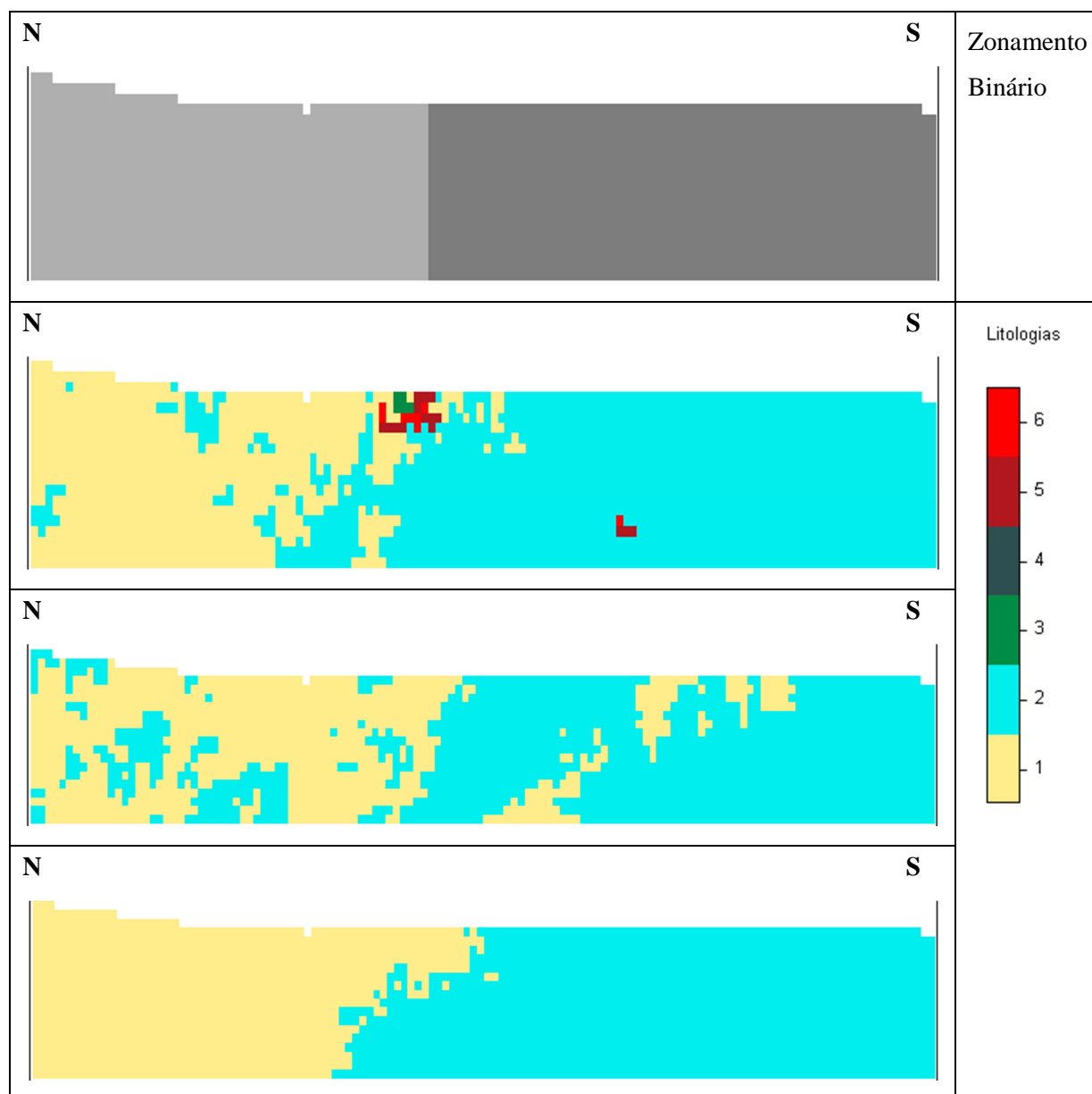


Figura 5.18. Zonamento binário, duas imagens simuladas equiprováveis e imagem média das 20 realizações das litologias: (1) Granito porfiróide; (2) Granito biotítico (3) Micaxistos; (4) Migmatitos (5) Granito brechificado (6) Pegmatito. (Plano YZ, X=230550m).

Em todas as situações os resultados estão conforme o esperado, verificando-se um condicionamento das imagens simuladas às duas fases de maior predominância, com clara distinção entre a Zona Norte, com maior proporção da fácies Granito Porfíróide, e a Zona Sul, onde o Granito Biotítico prevalece (Figura 5.16 a 5.18).

A validação dos resultados nesta fase foi feita por observação da coincidência dos dados experimentais com as simulações, por análise dos estatísticos (Tabela 5.5) e dos variogramas das imagens simuladas (Figuras 5.19 a 5.24).

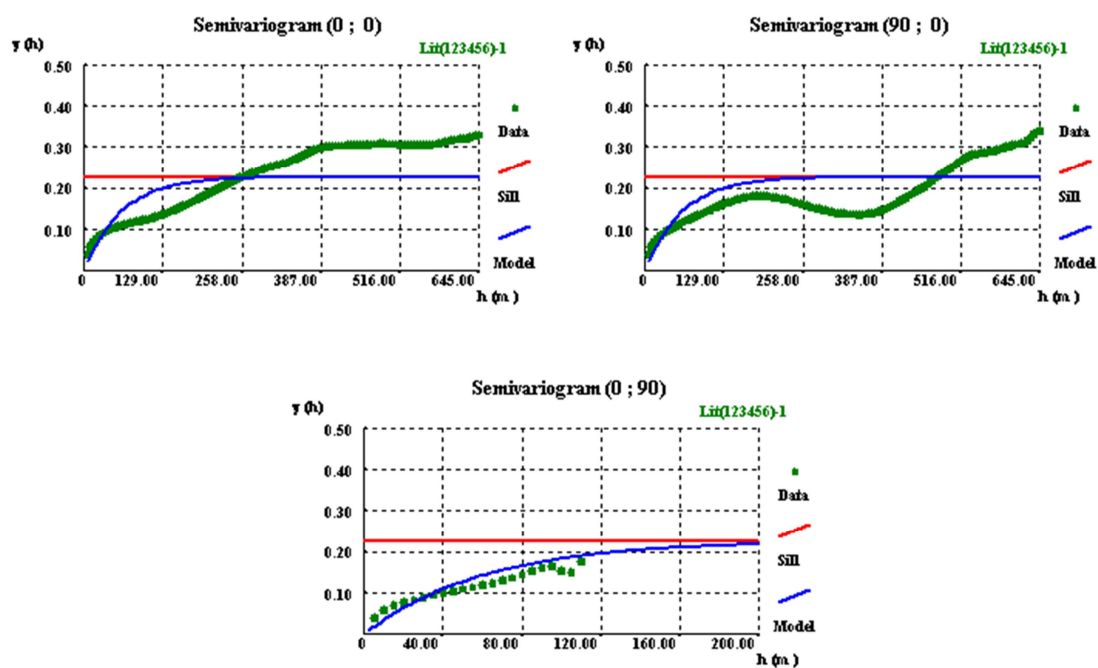
Tabela 5.5. Proporções globais de cada litologia dos dados experimentais, dos dados obtidos por krigagem da indicatriz e de três imagens simuladas por SIS com desagrupamento por condicionamento às médias locais.

Litologia	Frequências				
	Dados experimentais	Krigagem da indicatriz	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
Granito Porfíróide	0,5045	0,3488	0,3414	0,3419	0,3468
Granito Biotítico	0,3949	0,5679	0,5628	0,5647	0,5602
Micaxisto	0,0099	0,0144	0,0109	0,0090	0,0121
Migmatito	0,0062	0,0074	0,0035	0,0035	0,0046
Granito Brechificado	0,0363	0,0269	0,0149	0,0186	0,0174
Pegmatito	0,0483	0,0346	0,0665	0,0624	0,0590
TOTAL	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

A análise variográfica dos resultados simulados evidencia um fenómeno importante de reportar: o da existência de efeitos de zonalidade que resultam do condicionamento efectuado. Temos, assim, a existência, por cada fase litológica, de duas estruturas. Uma primeira, de menor continuidade, análoga à dos dados de partida e uma segunda, de maior continuidade, resultante dos condicionamento às duas regiões definidas pelas fácies dominantes Granito Porfíróide e Granito Biotítico.

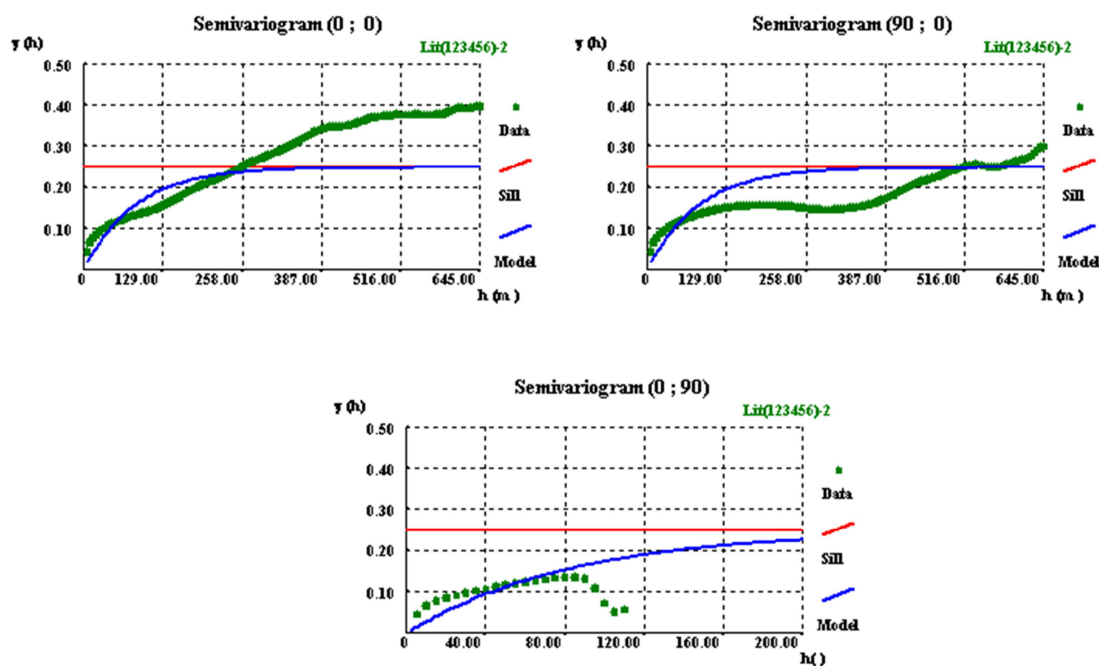
Os variogramas das simulações apresentam, assim, uma estrutura mais contínua do que se seria de esperar, o que se coaduna com a lógica introduzida, logo à partida, de se condicionar os resultados das simulações a estas duas regiões (Figuras 5.19 a 5.24).

Na figura 5.25 apresentam-se o cenário médio das simulações das litologias, respectivamente para as fácies Granito Porfíróide e Granito Biotítico (imagem superior) e restantes fácies (imagem inferior).



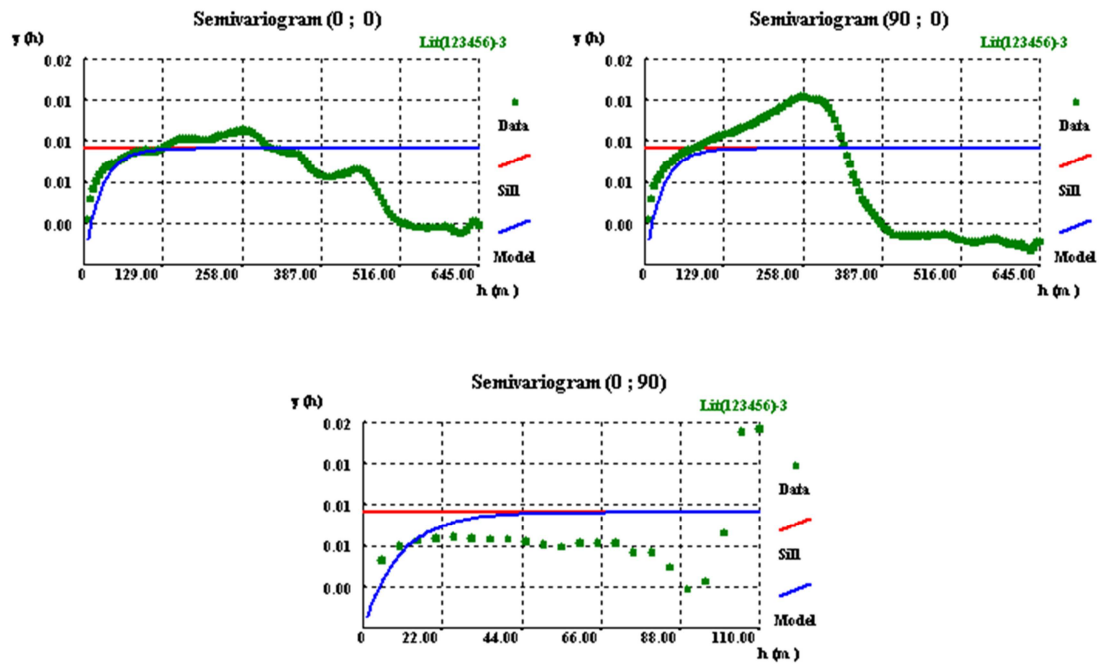
(Modelo: exponencial;  $C=0,225$ ;  $a_v=a_H=180$  metros)

Figura 5.19. Variogramas da litologia Granito Porfírido de uma imagem obtida por SSI com correcção de probabilidades locais.



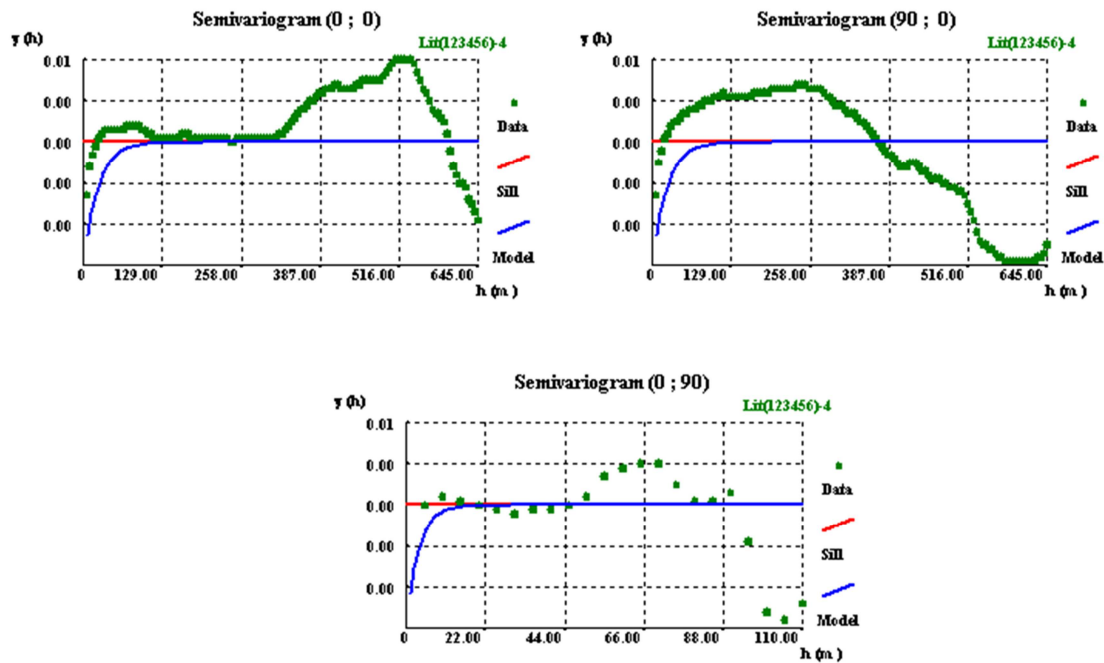
(Modelo: exponencial;  $C=0,24$ ;  $a_v=a_H=250$ m)

Figura 5.20. Variogramas da litologia Granito Biotítico de uma imagem obtida por SSI com correcção de probabilidades locais.



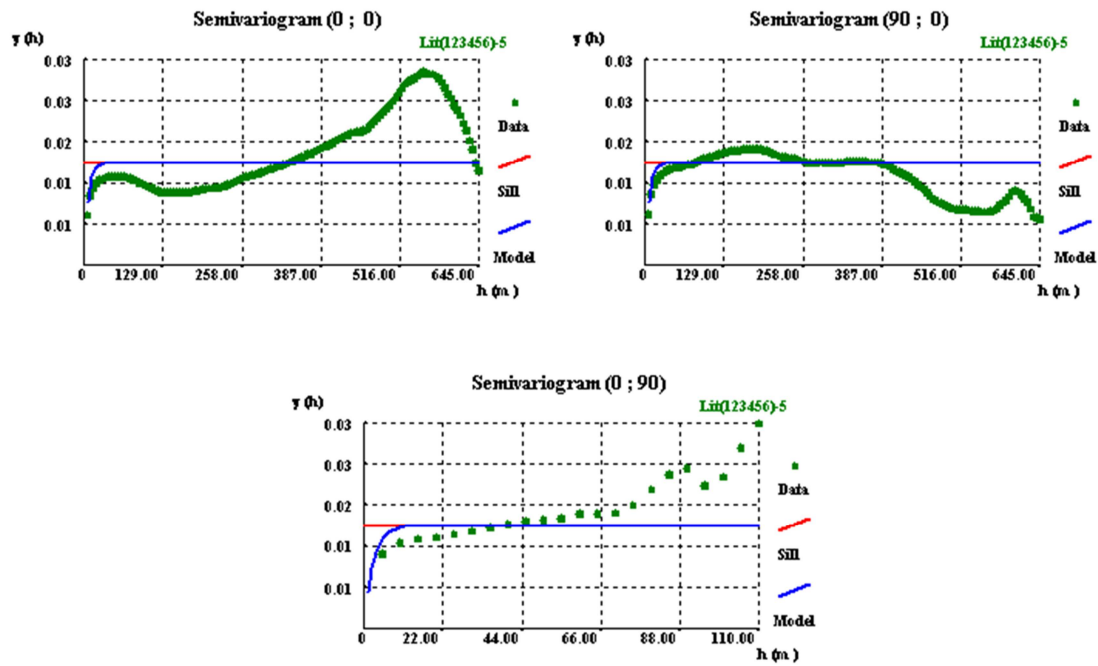
(Modelo: exponencial;  $C=0,009$ ;  $a_H=80m$ ;  $a_V=30 m$ ;  $r_a=2,6$ )

Figura 5.21. Variogramas da litologia Micaxisto de uma imagem obtida por SSI com correcção de probabilidades locais.



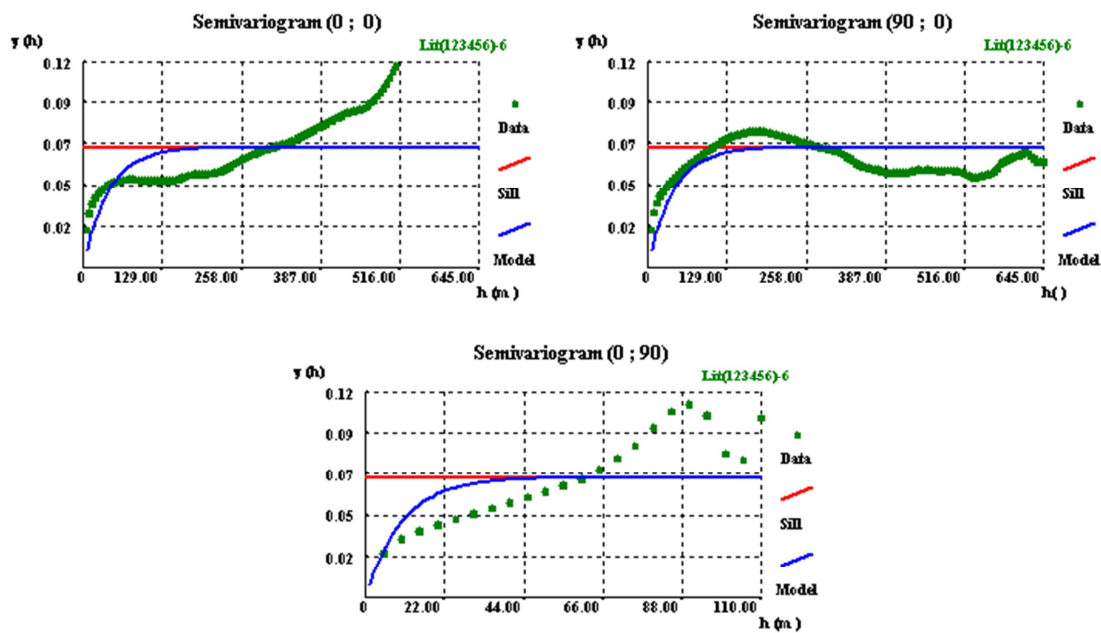
(Modelo: exponencial;  $C=0,004$ ;  $a_V=70m$ ;  $a_H=10 m$ ;  $r_a=7$ )

Figura 5.22. Variogramas da litologia Migmatito de uma imagem obtida por SSI com correcção de probabilidades locais.



(Modelo: exponencial;  $C=0,016$ ;  $a_v=20\text{m}$ ;  $a_H=7,5\text{ m}$ ;  $r_a=2,6$ )

Figura 5.23. Variogramas da litologia Granito brechificado de uma imagem obtida por SSI com correcção de probabilidades locais.



(Modelo: exponencial;  $C=0,062$ ;  $a_H=120\text{m}$ ;  $a_v=30\text{ m}$ ;  $r_a=4$ )

Figura 5.24. Variogramas da litologia Pegmatito de uma imagem obtida por SSI com correcção de probabilidades locais.



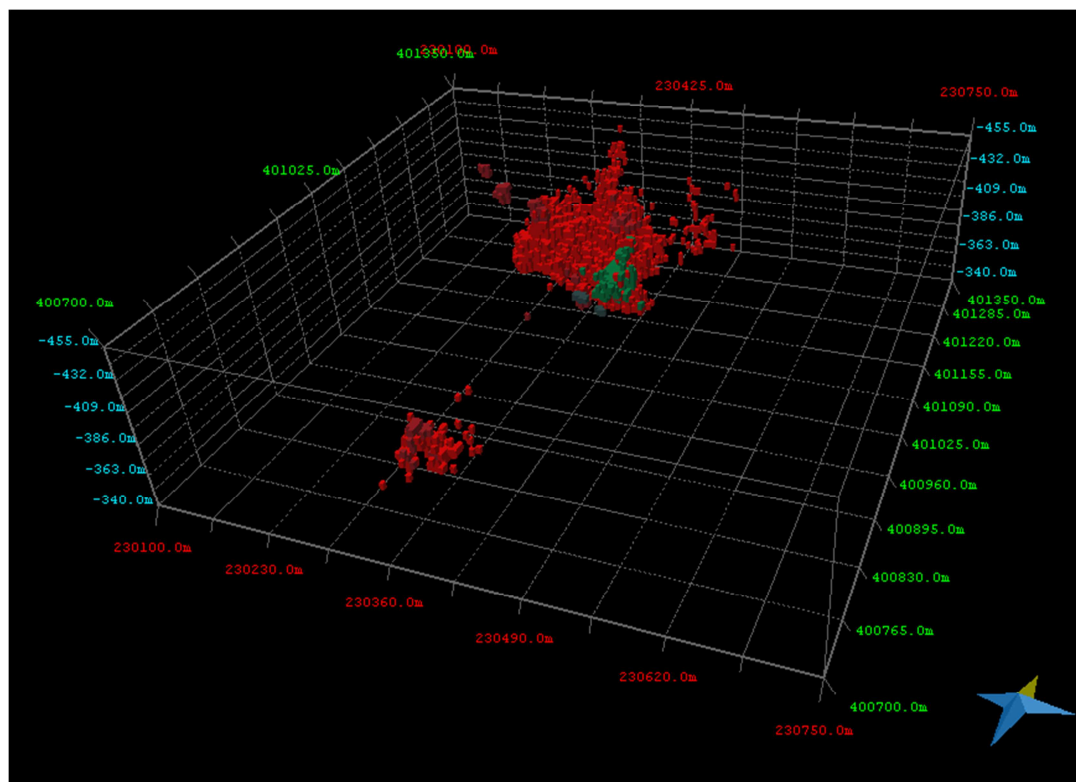
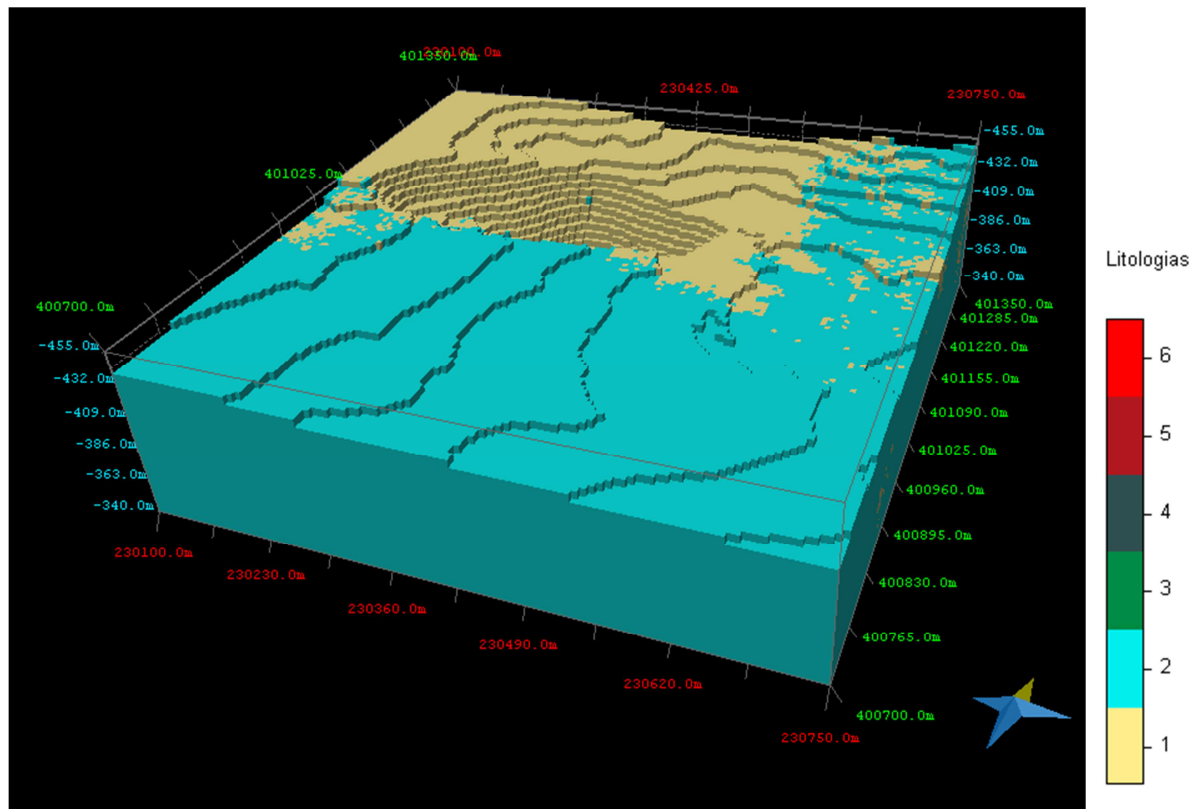


Figura 5.25. Em cima: visualização 3D do cenário médio das fácies Granito Porfiróide (1) e Granito Biotítico (2); em baixo: visualização 3D do cenário médio das fácies Micaxisto (3), Migmatito (4) Granito Brechificado (5) e Pegmatito (6) (MOVE® 2012.1).

## 5.2 MODELO 3D DA ALTERAÇÃO

### 5.2.1 TRATAMENTO E ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DE PARTIDA

À semelhança da variável *Litologia*, procedeu-se à interpretação e digitalização dos dados respeitantes ao grau de *Alteração* (W). Nos casos das sondagens resultantes de campanhas mais recentes, foi possível realizar uma análise por via da observação dos testemunhos de sondagens, seguindo de perto as interpretações constantes nos respectivos relatórios de execução. No caso da campanha mais antiga, efectuada com sondagens destrutivas, foram consideradas as interpretações existentes nos relatórios de sondagem, cruzando-se informações que, neste contexto, e indirectamente, são relevantes para possíveis interpretações, como sejam a cor do granito intersectado (“amarelado”, “avermelhado”, “rosado”, “acinzentado”, “esbranquiçado”) e indicações, por vezes, existentes quanto ao grau de dureza do maciço intersectado (“rocha dura”, “rocha mole”, “rocha muito mole”).

Foi construída a tabela da variável *Alteração*, onde, por sondagem, se categorizaram os dados em intervalos de profundidade inicial e final de acordo com os respectivos graus de alteração e de acordo com a classificação:

- **W4**, Maciço muito alterado, decomposto (classe “4”);
- **W3**, Maciço alterado (classe “3”);
- **W2**, Maciço pouco alterado (classe “2”);
- **W1**, Maciço inalterado, rocha sã (classe “1”).

Procedeu-se, então, à semelhança da variável *Litologia*, à regularização das observações em suportes constantes de 5 metros, compatíveis com a dimensão unitária da matriz de blocos.

Para melhor compreender o comportamento da variável *Alteração*, e responder às questões de estacionariedade, calcularam-se os metros de testemunho condicionais de cada grau de alteração, por litologia e por intervalos de profundidade (Tabela 5.6).

Tabela 5.6. Metragens dos quatro graus de alteração (W1, W2, W3 e W4) por litologia.

Litologia	Grau de alteração				
	W1	W2	W3	W4	Total (m)
1 Granito Porfíroide	14,1	111,1	302,8	375,9	803,9
2 Granito Biotítico	153,5	153,4	75,9	65,2	448,0
3 Micaxisto	0,0	6,2	2,3	6,2	14,7
4 Migmatito	0,0	6,3	2,8	0,1	9,2
5 Granito Brechificado	6,4	2,6	4,8	39,9	53,7
6 Pegmatito	6,0	2,2	37,0	26,3	71,5
Total (m)	180,0	281,8	425,6	513,6	1401

A Tabela 5.6 mostra a existência de padrões específicos pronunciados quando são comparadas as duas fácies dominantes - Granito Porfíróide e Granito Biotítico. Efectivamente, o maciço rochoso nas áreas do Granito Porfíróide encontra-se acentuadamente mais alterado do que nas áreas em que ocorre a fácies Granito Biotítico, inclusivamente a maiores profundidades, sendo mínima a proporção da classe W1, respeitante à rocha sã, na fácies Granito Porfíróide. Por sua vez, a metragem das classes W1 e W2 são mais altas no Granito Biotítico. A área de Micaxistos em que se inseria o xenólito, entretanto explorado, e onde ocorrem, igualmente, fácies de transição como Migmatitos, apresenta-se tendencialmente mais alterada.

Os resultados de *Alteração* por *Litologia* evidenciam, assim, uma maior incidência dos efeitos de alteração sericítica e argílica induzidos pela estrutura principal que intersecta o Bloco Norte do maciço, onde se encontra instaurado o “Granito Porfíróide,” e a existência de um maciço tendencialmente mais sã, menos alterado, localizado a sul, onde predominam as fácies de granitos predominantemente mais biotíticos.

Em virtude das tendências observadas considerou-se adequado que na simulação dos graus de Alteração fossem tidos em conta as respectivas proporções por litologia.

A informação de base da área, nomeadamente os resultados de prospecção geofísica, evidenciam a existência de uma zona de fronteira entre o maciço muito alterado e decomposto e o maciço rochoso, mais sã, que ocorrerá, em média, e salvo áreas sujeitas a efeitos de outras estruturas e/ou de alteração sericítica e argílica mais intensas, entre os 15 a 20 metros de profundidade (Figura 5.26).

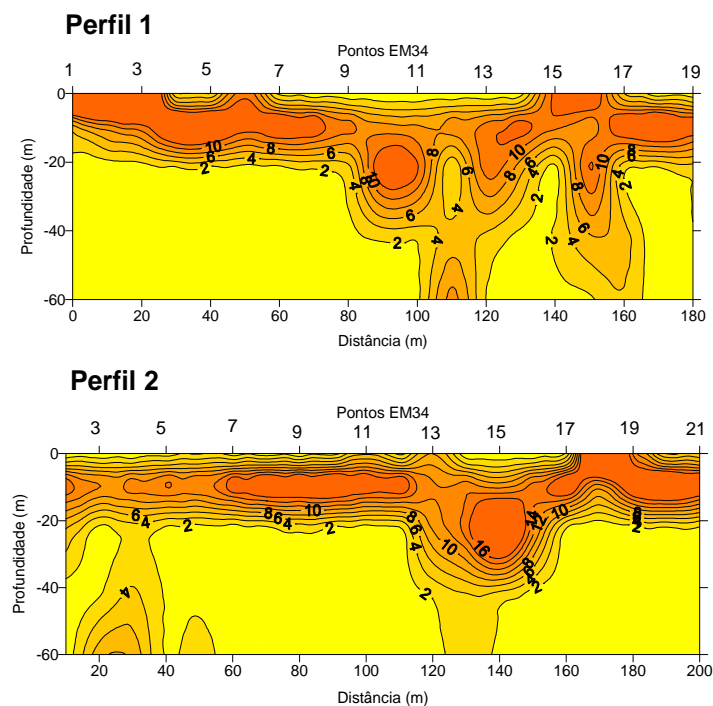


Figura 5.26. Exemplo de dois perfis de condutividades obtidas por modelação geoelectrica 2D com o recurso ao *software* EM34-2D na envolvente à corta mineira. Unidades mS/m (fonte: Carvalho *et al.*, 2005).

Relativamente à profundidade, ensaiaram-se histogramas condicionais dos graus de *Alteração* a intervalos de 20 m em profundidade (Tabela 5.7). Com a excepção de algumas particularidades as proporções calculadas parecem ser indiferentes à profundidade.

Tabela 5.7. Frequências relativas das quatro classes do grau de alteração (W1, W2, W3 e W4) repartidas por intervalos de profundidade de 20 em 20 metros.

Granito Porfíróide				
Profundidade (m)	W1	W2	W3	W4
0-20	0,00	0,07	0,35	0,58
21-40	0,00	0,21	0,40	0,39
41-60	0,00	0,27	0,37	0,36
61-95	0,03	0,26	0,28	0,43
Granito Biotítico				
Profundidade (m)	W1	W2	W3	W4
0-20	0,18	0,20	0,25	0,37
21-40	0,36	0,32	0,22	0,10
41-60	0,30	0,30	0,25	0,15
61-95	0,53	0,47	0,00	0,00

Seguidamente analisaram-se os dados considerando-se apenas uma fronteira a 15 metros (Tabela 5.8). Aqui, a consideração deste limite introduz uma mais-valia em termos de interpretação, dado que, para as classes extremas da *Alteração* – “W1” e “W4” – e para os dois tipos de granitos predominantes – Granito Porfíróide e Granito Biotítico - acentuam-se diferenças entre as proporções.

Tabela 5.8. Frequências relativas das quatro classes do grau de alteração (W1, W2, W3 e W4), repartidas por dois intervalos de profundidade em função do limite dos 15 metros.

Granito Porfíróide				
Profundidade (m)	W1	W2	W3	W4
0-15	0,00	0,06	0,36	0,58
16-95	0,01	0,23	0,36	0,40
Granito Biotítico				
Profundidade (m)	W1	W2	W3	W4
0-15	0,09	0,20	0,25	0,45
16-95	0,39	0,31	0,20	0,10

Pelas razões expostas foi decidido que os modelos 3D da variável *Alteração* seriam condicionados, em termos de proporções por Litologia e por intervalo de profundidade, separado aos 15 metros.

Na sequência do levantamento dos dados respeitante às fracturas, realizou-se um reajustamento dos graus de alteração com a introdução da informação respeitante a níveis de fracturação fina que intersectam o maciço a diferentes profundidades, independentemente da litologia (Figura 5.27 e Figura 5.28). Trata-se de níveis onde a DLF é extremamente elevada, com distanciamentos entre fracturas milimétricos a centimétricos, e onde se observa intensa alteração do maciço, tornando-se, consequentemente, difícil a própria classificação destas fracturas de acordo com as suas características. No maciço rochoso em profundidade, tais níveis podem surgir bruscamente numa matriz rochosa muito pouco alterada a sã.

Esta característica do maciço - “fracturação fina” – que apresenta variabilidade e expressão ampla e variada, com espessura milimétrica a métrica, foi incluída nos suportes de 5 metros, ao considerar-se a sua existência nas proporções respeitantes à classe 4 W4 (Maciço muito alterado, decomposto) da variável *Alteração*.



Figura 5.27. Exemplos de níveis de “fracturação fina” em testemunhos do furo PP5B colhidos entre os 41,90 a 46,40 metros de profundidade.



Figura 5.28. Exemplo de níveis de “fracturação fina” em testemunhos do furo PP3B colhidos entre os 65,60 a 69,65 metros de profundidade.

Com os dados deste reajustamento, na Tabela 5.9 apresentam-se as proporções condicionais dos graus de *Alteração* por litologia e por classe de intervalo.

Tabela 5.9. Frequências relativas dos quatro graus de alteração (W1, W2, W3 e W4), por intervalos de profundidade estabelecidos em função do limite dos 15 metros e por litologia.

Profundidade 0-15 metros					
	W1	W2	W 3	W4	Σ
Granito Porfíróide	0,000	0,039	0,214	0,345	0,598
Granito Biotítico	0,038	0,078	0,083	0,150	0,349
Micaxisto	0,000	0,007	0,010	0,015	0,031
Migmatito	0,000	0,011	0,003	0,003	0,016
Granito Brechificado	0,000	0,001	0,001	0,003	0,005
Pegmatito	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Σ	0,038	0,136	0,310	0,515	1,000
Profundidade 16-95 metros					
	W1	W2	W 3	W4	Σ
Granito Porfíróide	0,009	0,104	0,153	0,218	0,484
Granito Biotítico	0,154	0,116	0,037	0,062	0,370
Micaxisto	0,000	0,005	0,000	0,000	0,005
Migmatito	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Granito Brechificado	0,009	0,001	0,006	0,039	0,055
Pegmatito	0,011	0,002	0,042	0,031	0,086
Σ	0,183	0,228	0,238	0,350	1,000

### 5.2.2 SIMULAÇÃO GEOESTATÍSTICA DA ALTERAÇÃO

Pelas razões anteriormente expostas e considerando os padrões evidenciados nos histogramas condicionais, os modelos 3D da Alteração foram simulados com a SSI com condicionamento a proporções locais, por Litologia e a duas regiões, definidas em função da profundidade dos 15 metros (0-15 metros e 16-95 metros, conforme Figura 5.29).

Após a análise variográfica realizada e em virtude do tipo de fenómeno espacial em causa – evolução tridimensional do grau de alteração – e das estruturas inerentes a cada fase, por vezes de difícil modelação variográfica em virtude de efeitos de agrupamento e falta de representatividade ou de reduzida continuidade espacial face às dimensões dos modelos a construir (Figura 5.30) considerou-se mais ajustado recorrer ao variograma multifásico (Figura 5.31), adoptando um modelo exponencial, isótropo, com amplitude de 60 metros.

Considerando-se como situação de partida, as 20 realizações das Litologias, geraram-se, para cada uma destas, 5 simulações da Alteração, totalizando 100 realizações.



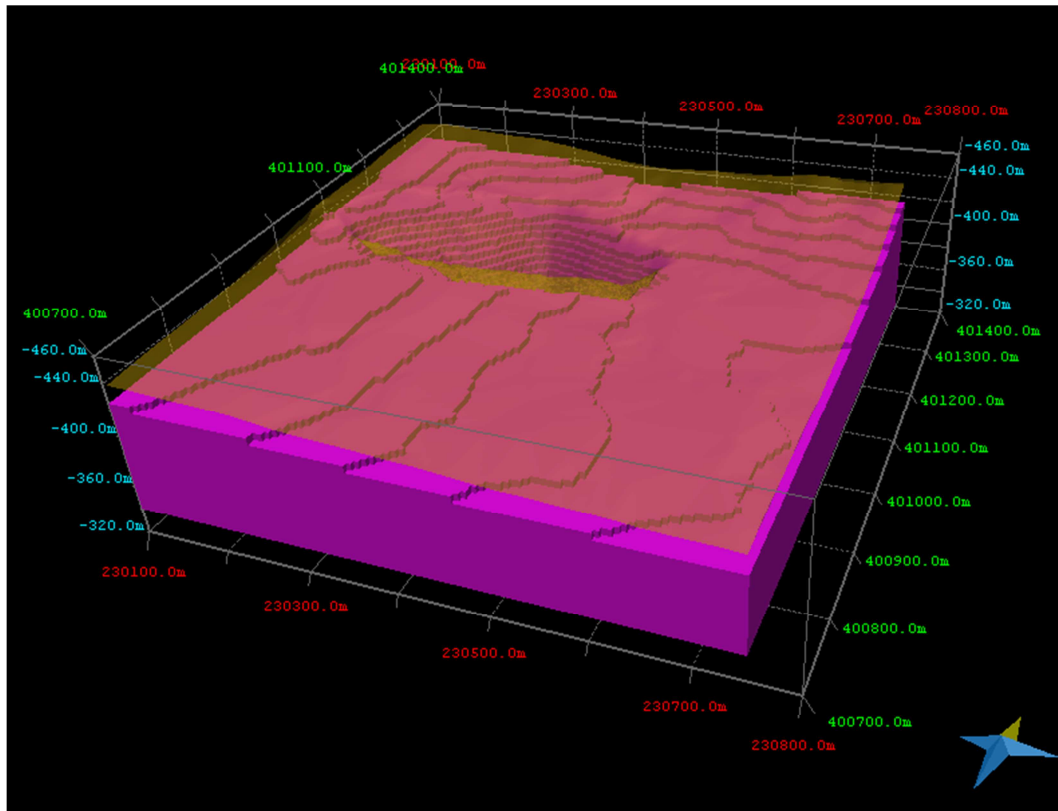


Figura 5.29. Visualização 3D das regiões definidas em função da profundidade dos 15 metros (MOVE® 2012.1).

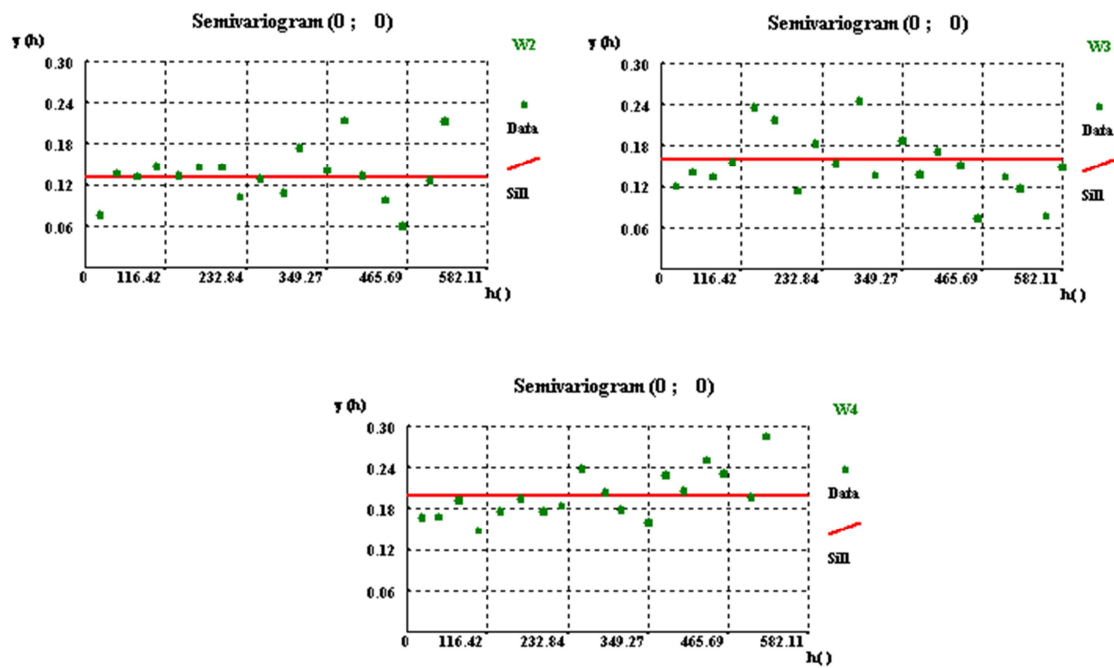
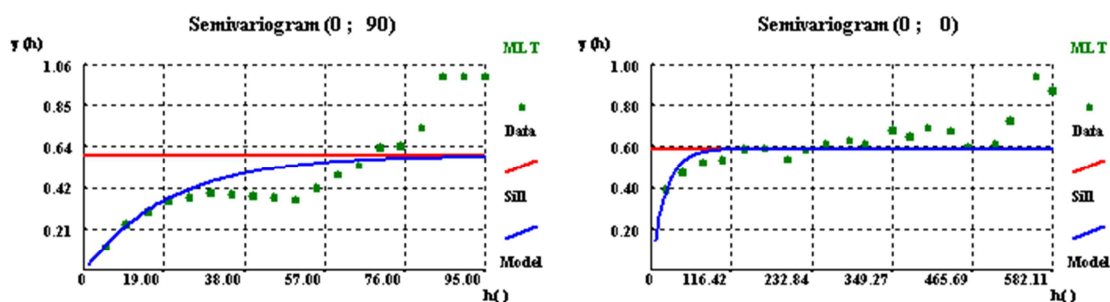


Figura 5.30 Variogramas experimentais omnidireccionais em XY das variáveis W2, W3 e W4.



(Modelo: exponencial;  $C=0,60$ ;  $a_H=a_V=60$  m;  $r=1$ )

Figura 5.31. Variograma experimental omnidirecional multifásico da variável Alteração com ajustamento a um modelo teórico exponencial.

Exemplos de duas imagens simuladas da Alteração constam na Figura 5.32, na Figura 5.33 e na Figura 5.34, comparando-se as mesmas com a imagem média das 100 realizações e o exemplo de uma imagem simulada da litologia. Na Figura 5.33 e na Figura 5.34 incluem-se, igualmente, os perfis do zonamento binário respeitante ao limite de profundidade dos 15 metros. É de notar, a maior tendência nas proporções de resultados das classes 3 e 4 (rocha mais alterada) na zona Norte, nas áreas de maior predominância da fácies de “Granitos Porfíróide” e a maior tendência das classes menos alteradas na zona sul, associável essencialmente aos “Granitos Biotíticos”

Na Tabela 5.10 apresentam-se as frequências relativas dos quatro graus de alteração (W1, W2, W3 e W4), por intervalos de profundidade estabelecidos em função do limite dos 15 metros e por litologia para o caso de três simulações com reajustamento da classe W4 devido aos níveis de “fracturação fina”.

Na Figura 5.36 apresenta-se a visualização 3D de duas imagens médias das 100 realizações.



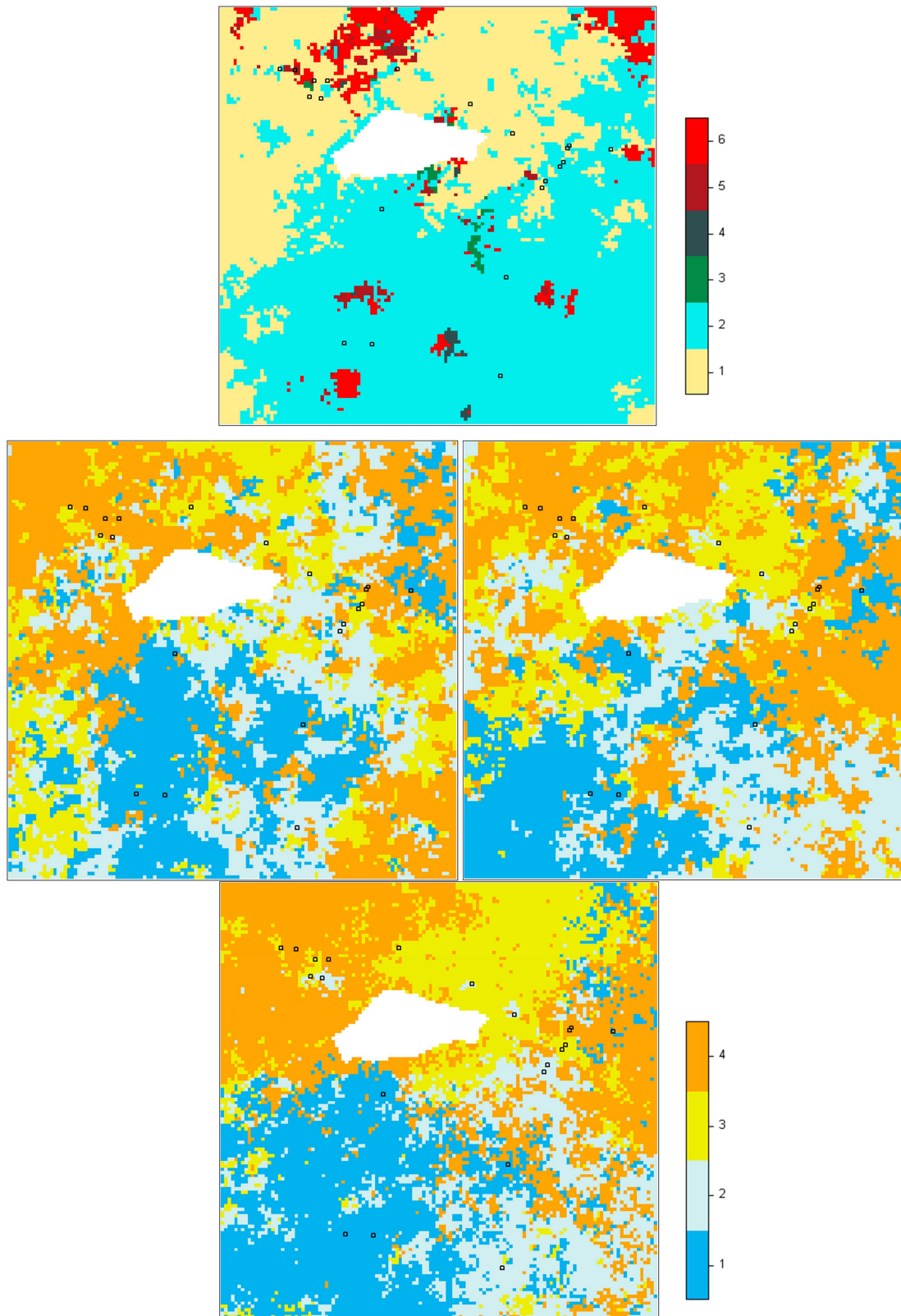


Figura 5.32. Imagens simuladas de Litologias (em cima), de Alteração (duas imagens ao centro) e imagem média das 100 simulações de alteração (em baixo): (1) Maciço inalterado, rocha sã (2) Maciço pouco alterado (3) Maciço alterado (4) Maciço muito alterado, decomposto (Plano XY, Z=387,5m). Comparação de resultados com uma imagem simulada das litologias em que: (1) Granito Porfiróide (2) Granito Biotítico (3) Micaxistos (4) Migmatitos (5) Granito Brechificado (6) Pegmatito.

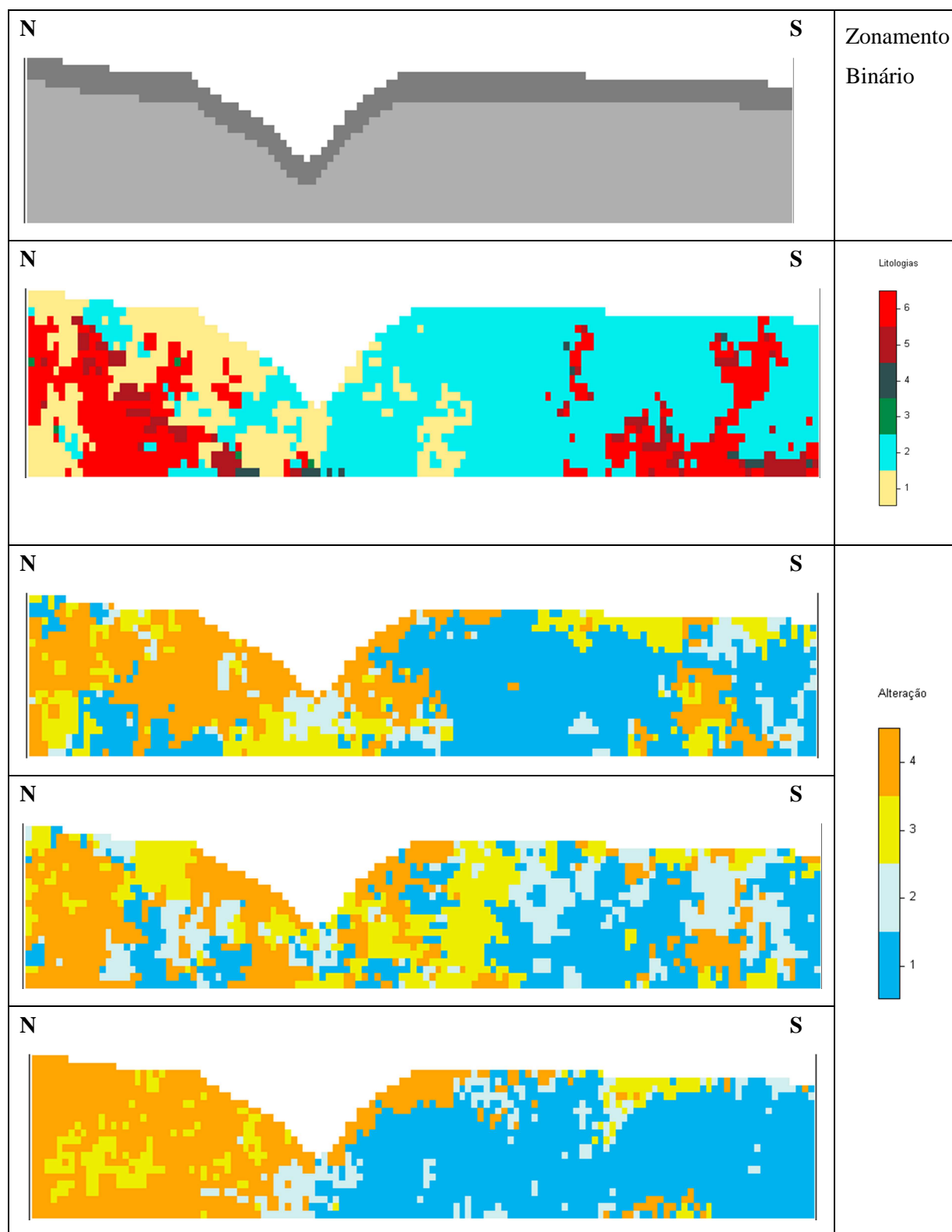


Figura 5.33. Zonamento binário de 15 metros, imagens simuladas de Litologias (1) e Alteração (2) e imagem média das 100 simulações de alteração (em baixo): (1) Maciço inalterado, rocha sã (2) Maciço pouco alterado (3) Maciço alterado (4) Maciço muito alterado, decomposto. Comparação de resultados com uma imagem simulada das litologias em que: (1) Granito Porfiróide; (2) Granito Biotítico (3) Micaxistos; (4) Migmatitos (5) Granito Brechificado (6) Pegmatito (Plano YZ, X=230300m).

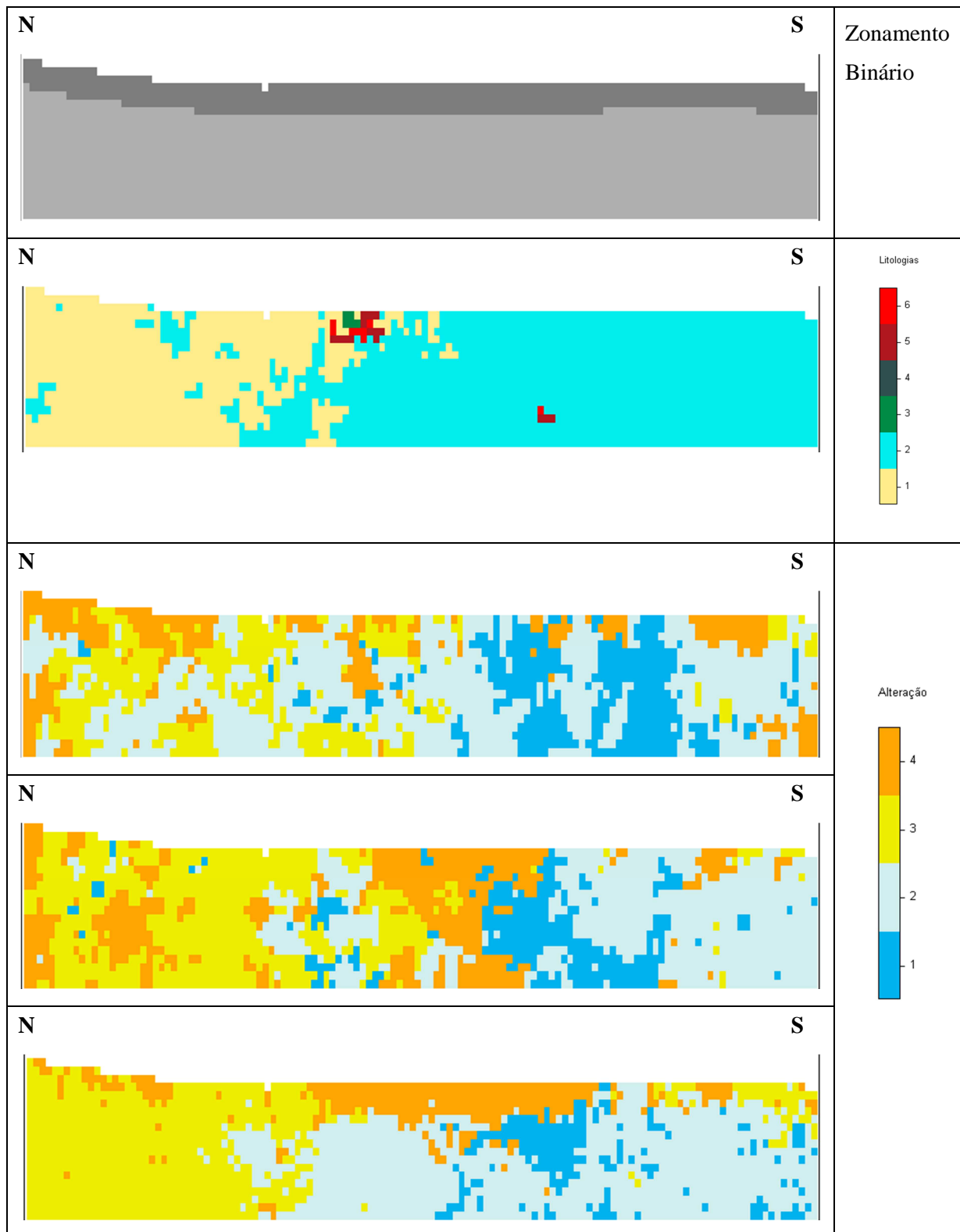
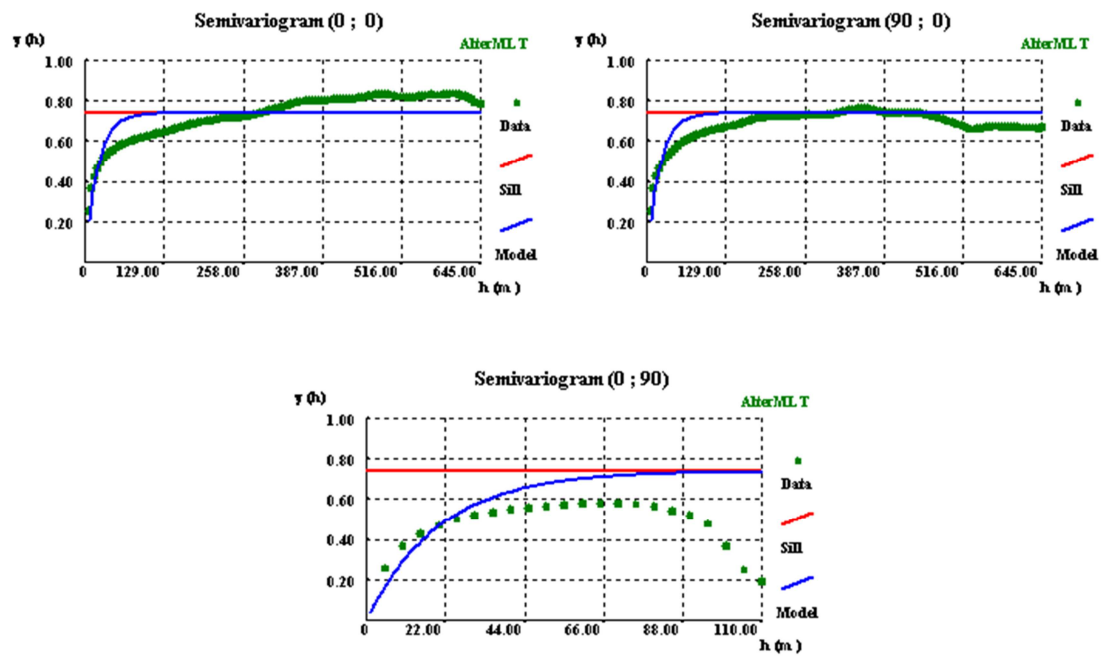


Figura 5.34. Zonamento binário de 15 metros, imagens simuladas de Litologias e de Alteração (2) e imagem média das 100 simulações de alteração (em baixo): (1) Maciço inalterado, rocha sã (2) Maciço pouco alterado (3) Maciço alterado (4) Maciço muito alterado, decomposto. Comparação de resultados com uma imagem simulada das litologias em que: (1) Granito Porfiróide; (2) Granito Biotítico (3) Micaxistos; (4) Migmatitos (5) Granito Brechificado (6) Pegmatito (Plano YZ, X=230550m).



(Modelo: exponencial;  $C=0,60$ ;  $a_H=a_V=60$  m;  $r=1$ )

Figura 5.35. Variograma omnidireccional multifásico da Alteração de uma imagem obtida por SSI com correcção de probabilidades locais.

CASO DE ESTUDO PARTE I: MODELAÇÃO 3D DAS LITOLOGIAS, ALTERAÇÃO, LIMONITIZAÇÃO E  
FRACTURAÇÃO

Tabela 5.10. Frequências relativas dos quatro graus de alteração (W1, W2, W3 e W4), por intervalos de profundidade estabelecidos em função do limite dos 15 metros e por litologia para o caso de três simulações com reajustamento da classe W4 devido aos níveis de “fracturação fina”.

Simulação 1					
Profundidade 0-15 metros	W1	W2	W 3	W4	Σ
Granito Porfíróide	0.010	0.036	0.109	0.197	0.351
Granito Biotítico	0.073	0.117	0.137	0.241	0.567
Micaxisto	0.001	0.003	0.005	0.007	0.016
Migmatito	0.000	0.002	0.001	0.001	0.005
Granito Brechificado	0.001	0.002	0.002	0.006	0.011
Pegmatito	0.010	0.011	0.012	0.017	0.050
Σ	0.095	0.171	0.265	0.469	1.000
Simulação 1					
Profundidade 16-95 metros	W1	W2	W 3	W4	Σ
Granito Porfíróide	0.025	0.062	0.102	0.155	0.344
Granito Biotítico	0.225	0.157	0.069	0.106	0.556
Micaxisto	0.001	0.006	0.001	0.001	0.010
Migmatito	0.001	0.001	0.001	0.001	0.004
Granito Brechificado	0.003	0.002	0.003	0.012	0.021
Pegmatito	0.007	0.008	0.025	0.025	0.064
Σ	0.262	0.237	0.201	0.301	1.000
Simulação 2					
Profundidade 0-15 metros	W1	W2	W 3	W4	Σ
Granito Porfíróide	0.010	0.031	0.111	0.199	0.351
Granito Biotítico	0.070	0.125	0.131	0.242	0.567
Micaxisto	0.001	0.003	0.005	0.007	0.016
Migmatito	0.001	0.002	0.001	0.001	0.005
Granito Brechificado	0.001	0.002	0.002	0.006	0.011
Pegmatito	0.010	0.010	0.014	0.016	0.050
Σ	0.092	0.173	0.263	0.471	1.000
Simulação 2					
Profundidade 16-95 metros	W1	W2	W 3	W4	Σ
Granito Porfíróide	0.022	0.067	0.103	0.152	0.344
Granito Biotítico	0.226	0.159	0.062	0.109	0.556
Micaxisto	0.001	0.007	0.001	0.001	0.010
Migmatito	0.001	0.001	0.001	0.001	0.004
Granito Brechificado	0.004	0.002	0.004	0.012	0.021
Pegmatito	0.007	0.007	0.025	0.025	0.064
Σ	0.261	0.243	0.196	0.300	1.000
Simulação 3					
Profundidade 0-15 metros	W1	W2	W 3	W4	Σ
Granito Porfíróide	0.014	0.029	0.112	0.195	0.351
Granito Biotítico	0.069	0.122	0.133	0.244	0.567
Micaxisto	0.001	0.003	0.005	0.008	0.016
Migmatito	0.000	0.002	0.001	0.001	0.005
Granito Brechificado	0.001	0.002	0.001	0.006	0.011
Pegmatito	0.010	0.011	0.012	0.016	0.050
Σ	0.095	0.169	0.265	0.471	1.000
Simulação 3					
Profundidade 16-95 metros	W1	W2	W 3	W4	Σ
Granito Porfíróide	0.021	0.065	0.105	0.153	0.344
Granito Biotítico	0.226	0.159	0.062	0.109	0.556
Micaxisto	0.001	0.007	0.001	0.002	0.010
Migmatito	0.001	0.001	0.001	0.001	0.004
Granito Brechificado	0.003	0.002	0.004	0.012	0.021
Pegmatito	0.007	0.009	0.024	0.024	0.064
Σ	0.259	0.243	0.197	0.301	1.000

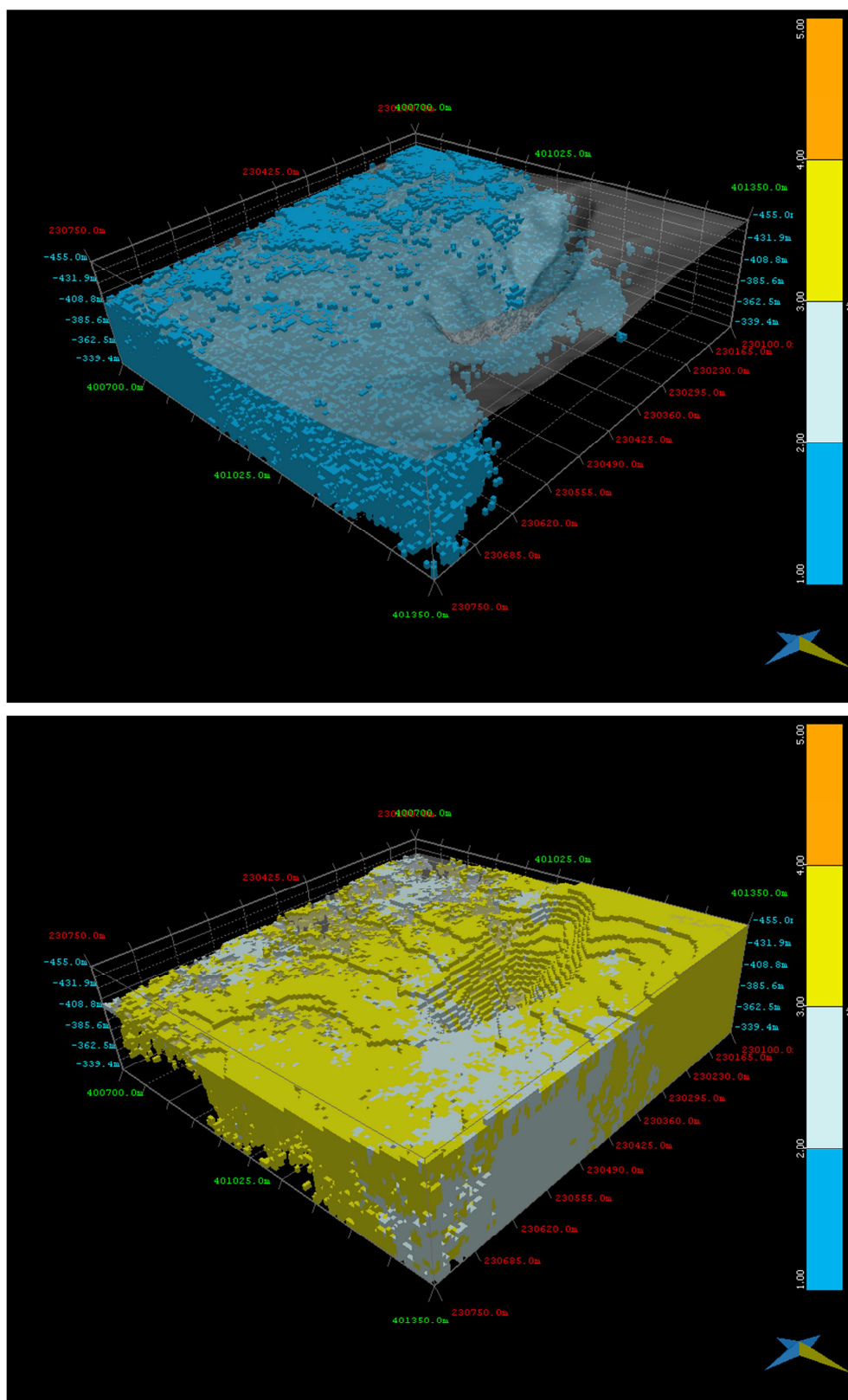


Figura 5.36. Visualização 3D da imagem média de alteração. Em cima (1) Maciço inalterado, rocha sã e (2) Maciço pouco alterado (3); em baixo: fases Maciço alterado (4) e Maciço muito alterado (MOVE® 2012.1).



## 5.3 MODELO 3D DA LIMONITIZAÇÃO

### 5.3.1 TRATAMENTO E ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DE PARTIDA

Com esta variável pretende-se marcar os locais em que se verificam efeitos resultantes da circulação de fluidos nos sistemas de fracturas e na matriz (Lin *et al.*, 2007), identificando-se precipitação de limonite que podem explicar a existência de circulação de água, especialmente em maiores profundidades (Figura 5.37).

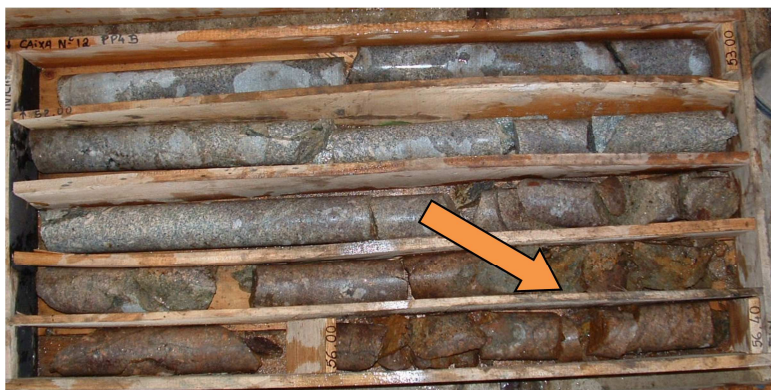


Figura 5.37. Furo PP4B – 52,00 a 56,40 metros de profundidade. Efeitos de oxidação do maciço (limonitização), por circulação de fluidos aquosos em área hematitizada e brechificadas.

Esta propriedade qualitativa foi tratada para todos os furos com testemunhos, pretendendo-se por via do seu levantamento, identificar as áreas do maciço fracturado que estão ou que, a dada altura, tenham estado sujeitas à circulação de fluidos aquosos, mediante o registo da existência de materiais de cor amarelo-alaranjada, resultantes da precipitação de hidróxidos de ferro em preenchimentos de falhas ou nas faces rochosas das fracturas.

Para o efeito, numa fase inicial, foram consideradas as seguintes classes:

- Superfícies das fracturas oxidadas (preenchimento fino, tipo "ferruginoso" - limonitização) + Toda a matriz se apresenta oxidada (6);
- Superfícies das fracturas apresentam-se oxidadas + Matriz de aspecto e cor oxidada apenas junto das fracturas (5);
- Superfícies das fracturas apresentam-se oxidadas + Matriz sã, sem aspecto oxidado (4);
- Superfícies das fracturas apresentam-se pouco oxidadas + Matriz de aspecto e cor oxidada apenas junto das fracturas (3);
- Superfícies das fracturas apresentam-se pouco oxidadas + Matriz sã, sem aspecto oxidado (2);
- Superfícies das fracturas não apresentam efeitos de oxidação/ limonitização + Matriz sã, sem aspecto oxidado (1);

- Matriz muito decomposta mas sem aspecto limonitizado (0).

Posteriormente, e de acordo com diversos ensaios variográficos e de estimação realizados e, ainda, de modo a compatibilizar os resultados da alteração com os da limonitização, sem hajam sobreposições de resultados com o mesmo significado em termos físicos ou para que não se verifiquem situações de resolução matemática incompatíveis nos possíveis campos 3D a gerar, efectuou-se uma reclassificação dos dados, conforme se ilustra na Figura 5.38, passando-se, a considerar as seguintes duas classes:

- Fracturas e/ou matriz com poucos ou nenhuns efeitos de circulação de águas (*Limo1*);
- Fracturas e/ou matriz com efeitos de circulação de águas (*Limo2*).

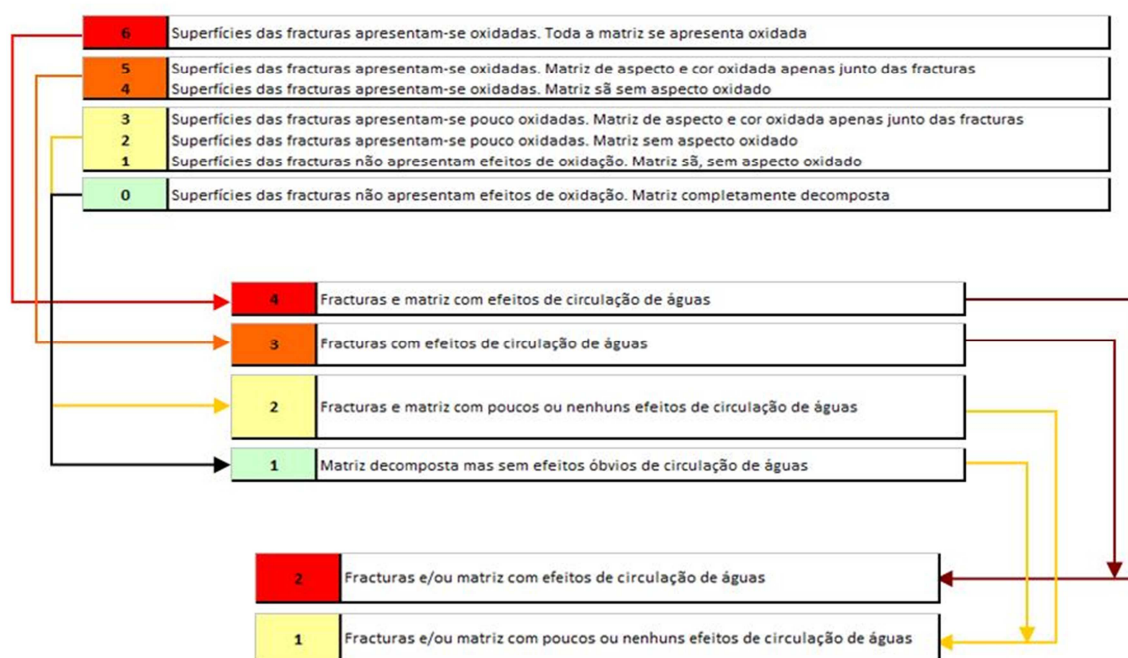


Figura 5.38. Reclassificação das classes respeitantes ao atributo limonitização

À semelhança da variável *Alteração*, efectuou-se uma análise aos dados de partida, condicionando-se os mesmos às 6 classes litológicas e ao limite de profundidade dos 15 metros (Tabela 5.11).

Como é de esperar, os efeitos de limonitização são mais evidentes no Granito porfiróide, sendo de relevar, igualmente, que também são identificáveis em profundidade, nas zonas onde a matriz rochosa se apresenta menos alterada.



Tabela 5.11. Frequências relativas das duas classes de Limonitização, repartidas por dois intervalos de profundidade, estabelecidos em função do limite dos 15 metros, e por litologia.

Profundidade 0-15 metros			
	Limo1	Limo2	$\Sigma$
Granito Porfíróide	0,276	0,307	0,584
Granito Biotítico	0,205	0,157	0,362
Micaxisto	0,019	0,014	0,033
Migmatito	0,009	0,007	0,017
Granito Brechificado	0,002	0,003	0,005
Pegmatito	0,000	0,000	0,000
$\Sigma$	0,511	0,489	1,000
Profundidade 16-95 metros			
	Limo1	Limo2	$\Sigma$
Granito Porfíróide	0,324	0,148	0,472
Granito Biotítico	0,331	0,060	0,391
Micaxisto	0,006	0,000	0,006
Migmatito	0,000	0,000	0,000
Granito Brechificado	0,008	0,033	0,041
Pegmatito	0,088	0,002	0,091
$\Sigma$	0,757	0,243	1,000

Sobre esta variável, convém clarificar que a sua utilização deve ser cuidada e bastante ponderada em virtude do enquadramento geológico específico desta área, sujeita a efeitos de mineralização primários e de alteração supergénica, onde a ocorrência de precipitados de óxidos e hidróxidos de ferro (e manganês) pode ter as seguintes três origens possíveis sendo estas, por vezes, possíveis de se sobrepor:

- Ser consequência directa dos processos de enriquecimento supergénico e, portanto, inerentes às formações existentes, em particular a brechas graníticas;
- Ser resultante da circulação de fluidos, contaminados, originados superficialmente, a partir dos *hot-spots* da área mineira;
- Ser um testemunho da circulação de fluidos, não contaminados, mas com os típicos efeitos de oxidação, que ocorrem em estruturas, mesmo a maiores profundidades, que, de alguma forma, se encontram sob os efeitos atmosféricos e de águas meteóricas.

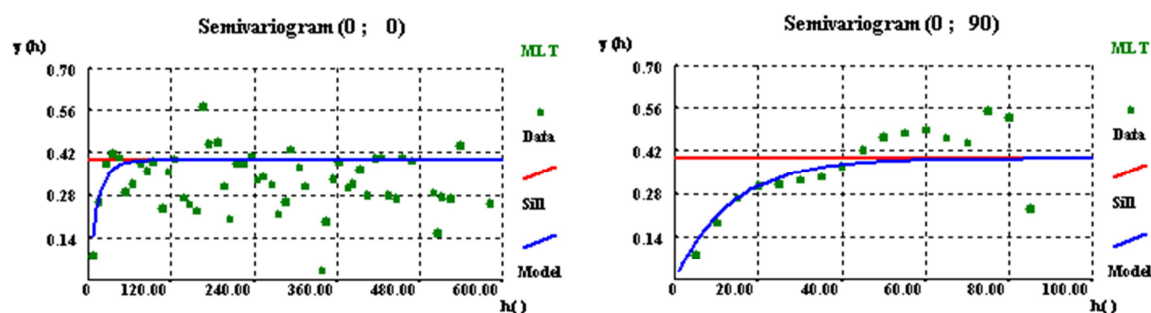
Dado que todas as outras variáveis seleccionadas são susceptíveis de expressar a maior ou menor possibilidade de circulação de fluidos num dado local, e porque se preconizou o levantamento, fractura a fractura, da existência ou não de óxidos, optou-se por não utilizar o modelo desta variável para a construção do modelo de transmissividade, reservando-se estes modelos simulados de Limonitização,

para possível utilização em fase subsequente, final, para comparações, aferições e/ou confirmar situações que se detectem nos modelos hidrogeológicos.

### 5.3.2 SIMULAÇÃO GEOESTATÍSTICA DA VARIÁVEL LIMONITIZAÇÃO

Considerando os fundamentos expostos anteriormente e uma vez verificados os padrões evidenciados nos histogramas da *Limonitização*, os modelos 3D desta variável foram obtidos por SSI Multifásica, com condicionamento aos histogramas locais da “Litologia” e a duas regiões, definidas em função da profundidade dos 15 metros (0-15 metros e 16-95 metros).

À semelhança da *Alteração*, após a análise variográfica, considerou-se mais ajustado recorrer ao variograma multifásico das observações, adoptando-se um modelo exponencial, isotrópico, com amplitude de 40 metros (Figura 5.39).



(Modelo: exponencial;  $C=0,42$ ;  $a_H=a_V=40$  m;  $r=1$ )

Figura 5.39 Variogramas multifásico da variável Limonitização e modelo teórico ajustado: esq) omnidireccional horizontal; dir) vertical.

Considerando-se como situação de partida as 20 realizações das Litologias, geraram-se para cada uma 5 simulações da Limonitização, totalizando 100 realizações.

Exemplos de duas imagens simuladas da Limonitização constam na Figura 5.40, na Figura 5.41 e na Figura 5.42, comparando-se as mesmas com a imagem média das 100 realizações e o exemplo de uma imagem simulada da alteração. Na Figura 5.41 e na Figura 5.42 incluem-se, igualmente, os perfis do zonamento binário respeitante ao limite de profundidade dos 15 metros, sendo de ressaltar a pouca inter-relação em termos espaciais dos resultados de simulação da Limonitização com os da Alteração.

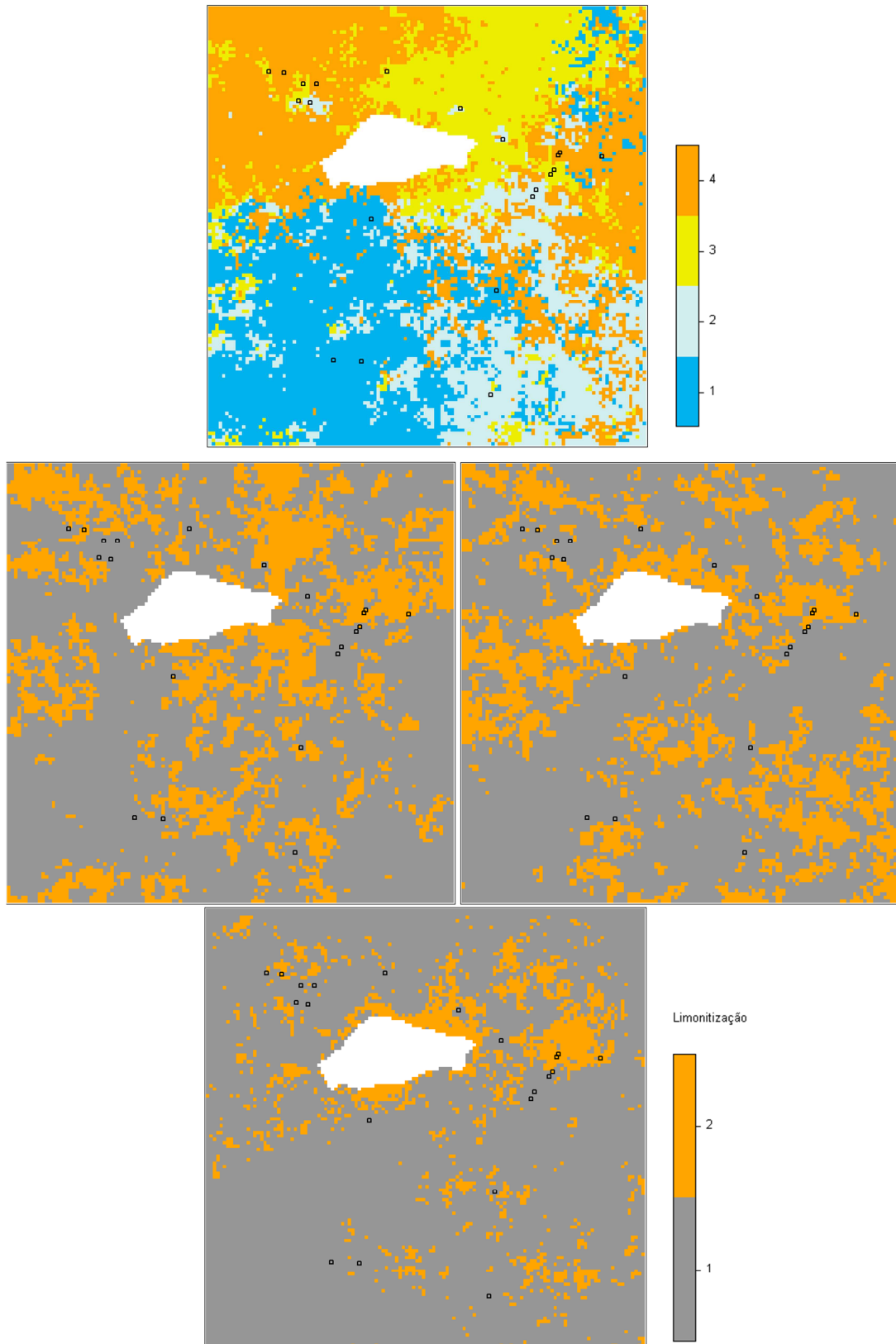


Figura 5.40. Imagem simulada de alteração (em cima), duas imagens simuladas de limonitização (ao centro) e imagem média de limonitização (em baixo): (1) Fracturas e/ou matriz com poucos ou nenhuns efeitos de circulação de águas; (2) Fracturas e/ou matriz com efeitos de circulação de águas (Plano XY, Z=387,5m). Comparação de resultados com uma imagem simulada da alteração em que (1) Maciço inalterado, rocha sã (2) Maciço pouco alterado (3) Maciço alterado e (4) Maciço muito alterado, decomposto.

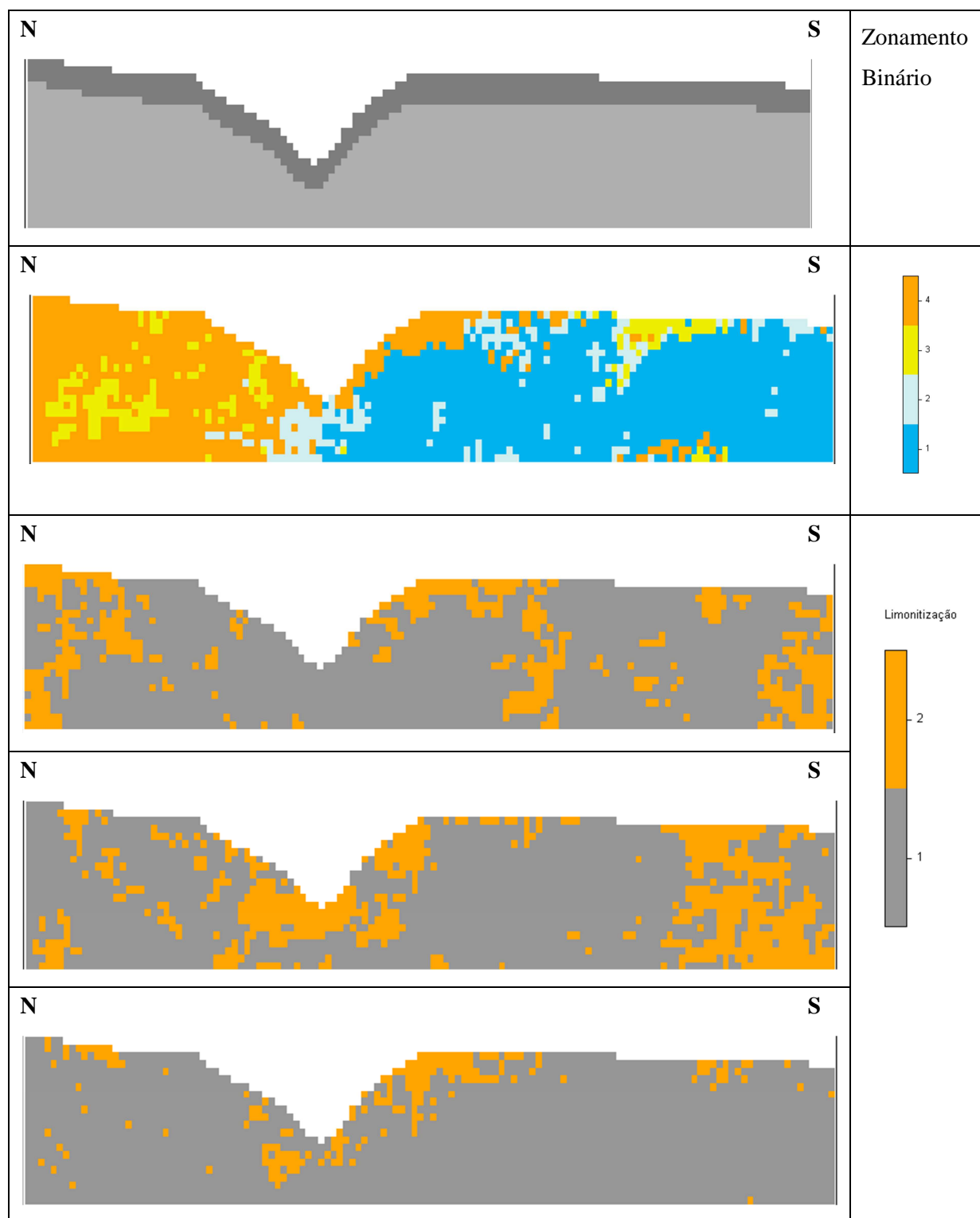


Figura 5.41. Zonamento binário de 15m, imagem simulada de alteração, duas imagens simuladas de limonitização e imagem média de limonitização: 1) Fracturas e/ou matriz com poucos ou nenhuns efeitos de circulação de águas; (2) Fracturas e/ou matriz com efeitos de circulação de águas (Plano YZ, X=230300m). Comparação de resultados com uma imagem simulada da alteração em que (1) Maciço inalterado, rocha sã (2) Maciço pouco alterado (3) Maciço alterado e (4) Maciço muito alterado, decomposto.

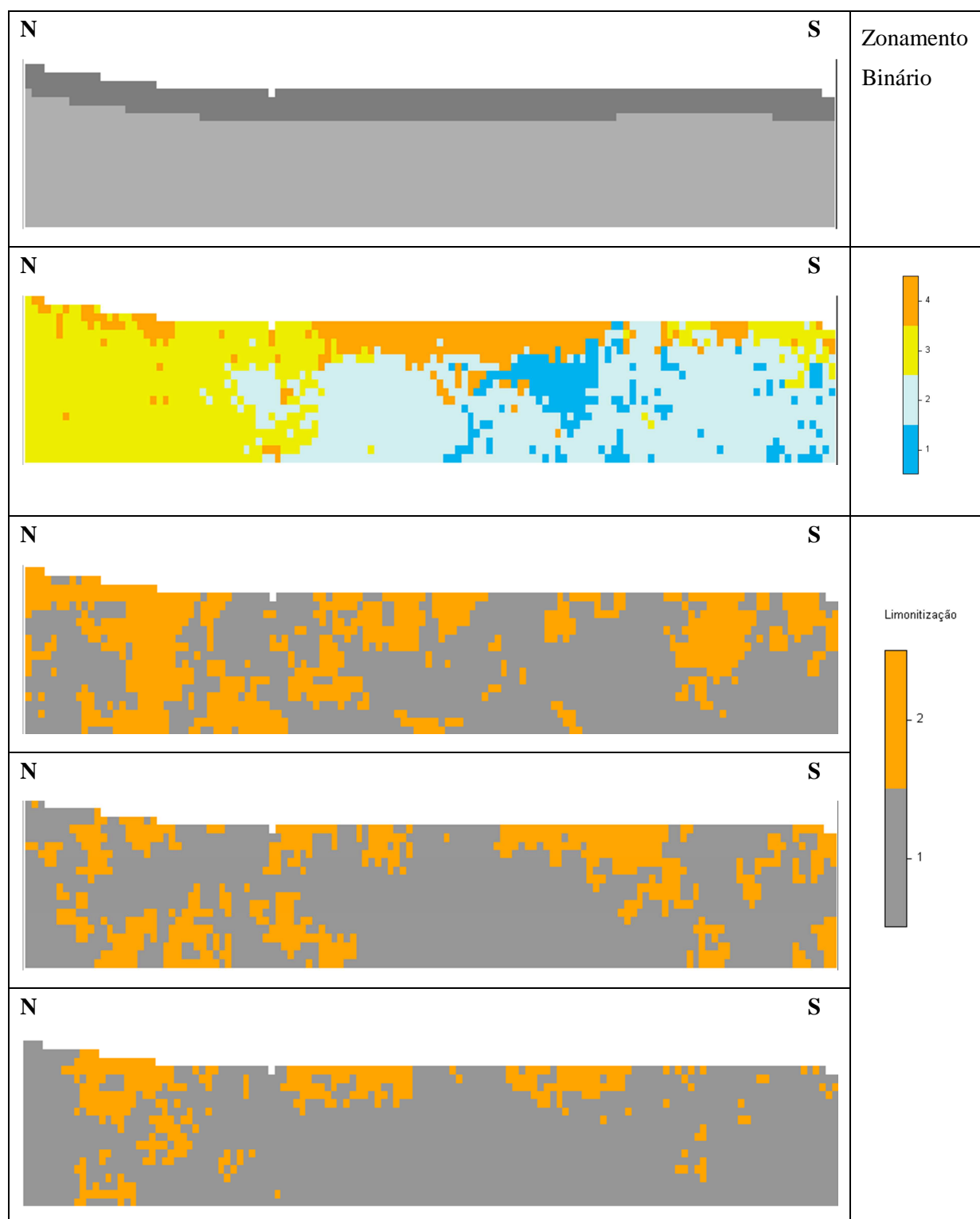


Figura 5.42. Zonamento binário de 15m, imagem simulada de alteração, duas imagens simuladas de limonitização e imagem média de limonitização: 1) Fracturas e/ou matriz com poucos ou nenhuns efeitos de circulação de águas; (2) Fracturas e/ou matriz com efeitos de circulação de águas (Plano YZ, X=230500m). Comparação de resultados com uma imagem simulada da alteração em que (1) Maciço inalterado, rocha sã (2) Maciço pouco alterado (3) Maciço alterado e (4) Maciço muito alterado, decomposto.

## 5.4 MODELO 3D DA FRACTURAÇÃO

### 5.4.1 LEVANTAMENTOS DE DETALHE

No levantamento de detalhe respeitante às características da fracturação (Billings, 1972; Ragan, 1973; Lin *et al.*, 2007; Chavez-Kus e Salamuni, 2008; Chesnaux *et al.*, 2009) foram considerados e interpretados os registos e imagens de testemunhos de sondagens, nos troços onde, em função do maior grau de recuperação, se verificou ser possível visualizar e classificar as fracturas intersectadas (Figura 5.43), considerando-se as seguintes características:

- Profundidade de ocorrência (m);
- Inclinação: sub-vertical ( $65^\circ$  a  $90^\circ$ ), sub-horizontal ( $0^\circ$ - $25^\circ$ ) e oblíqua ( $25^\circ$ - $65^\circ$ );
- Grau de preenchimento - sem preenchimento, com algum preenchimento, com preenchimento relevante);
- Natureza do preenchimento (quando existente): arenoso, argiloso, areno-argiloso;
- Abertura:  $\leq 1$  mm,  $> 1$  mm;
- Oxidação das superfícies: sim ou não.

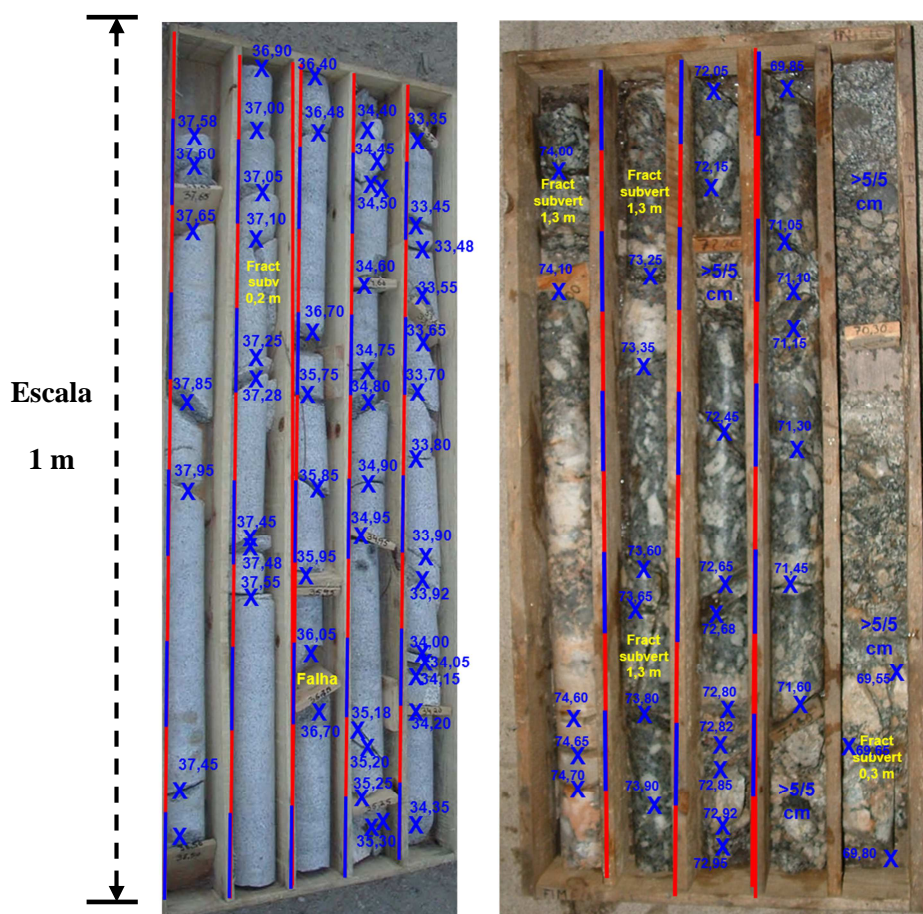


Figura 5.43. Exemplo de fracturas identificadas e categorizadas em logs de furos de sondagens (exemplos de troços respeitantes aos furos PP6B – à esquerda - e PP1B – à direita).

É de denotar que os levantamentos de base respeitantes à fracturação foram morosos em virtude da alta densidade de fracturação do maciço e do espaçamento, por vezes muito apertado, entre fracturas, o que implicou um tratamento de dados em bruto à escala centimétrica com posterior conversão de resultados à escala métrica. Em fase subsequente, procedeu-se à regularização desta informação em suportes de 5 metros para compatibilização da informação sobre fracturação com as matrizes restantes modelos.

Face às condicionantes inerentes ao tipo de informação disponível, resultantes do facto das sondagens disponíveis para levantamentos sobre fracturação não terem sido realizadas com recuperação integral dos testemunhos recolhidos e com levantamento de atitudes (directão + inclinação), a construção do modelo 3D de fracturação teve de ser assumida de modo simplificado, considerando-se no levantamento final, neste contexto, as características mais credíveis do ponto de vista de utilização a utilizar nas simulações. O facto de todas as sondagens serem verticais constituiu um aspecto relevante que permitiu, ainda assim, assumir o estabelecimento de famílias de inclinação aproximada das fracturas.

Do levantamento inicial, foram identificadas 16 famílias. Dada a complexidade que adviria da utilização de tal número de famílias realizaram-se subseqüentes reajustamentos considerando-se as seguintes características para a categorização final:

- Profundidade de ocorrência (m);
- Inclinação: sub-vertical ( $65^{\circ}$  a  $90^{\circ}$ ), sub-horizontal ( $0^{\circ}$ - $25^{\circ}$ ) e oblíqua ( $25^{\circ}$ - $65^{\circ}$ );
- Grau de preenchimento - sem ou com preenchimento;
- Natureza do preenchimento (se existente): areno-argiloso;
- Abertura:  $\leq 1$  mm,  $> 1$  mm;
- Oxidação das superfícies: sim ou não.

Dos levantamentos realizados é de relevar a existência de níveis de “fracturação fina”, na maioria das vezes, de aspecto tipo “entre-cruzado”, em localizações onde o maciço se apresenta mais alterado. O espaçamento inter-fractura destes níveis é milimétrico sendo muito frequentes as situações em que em virtude do elevado estágio de alteração, apenas é possível vislumbrar os traçados residuais de tais fracturas.

Considerando-se os níveis de “fracturação fina” o número total de fracturas reconhecidas foi de 8667 (valor aproximado pelas limitações dadas nos locais de “fracturação fina” em que o maciço se apresenta bastante alterado). A integração destes níveis, caracteristicamente muito alterados, na matriz de dados de alteração (classe W4 – maciço muito alterado) veio a reduzir drasticamente a quantidade de fracturas disponíveis para tratamento estatístico, para um total de 2667, número reflecte bem o

estado de fracturação intensa e de alteração associada em que, em termos gerais, se encontra o maciço rochoso estudado. O facto destes níveis de “fracturação fina” surgirem frequentemente alternados com rocha sã, ou pouco alterada, traduz as elevadas características de heterogeneidade do meio.

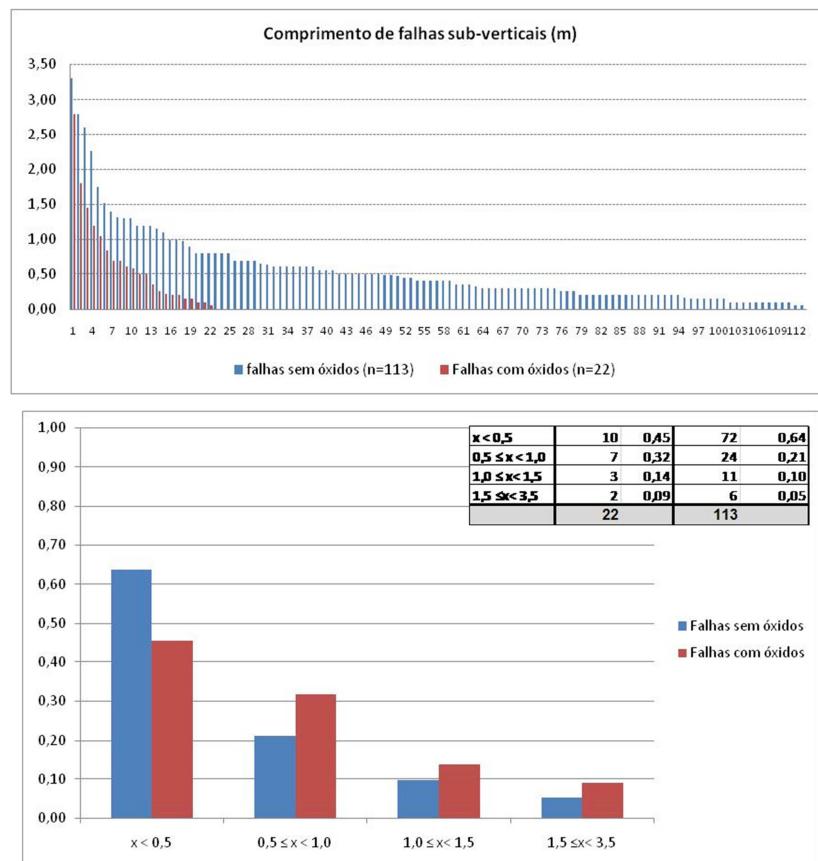


Figura 5.44. Distribuição aproximada dos comprimentos e frequências do comprimento das falhas sub-verticais que foram possíveis reconhecer e individualizar, sem consideração dos níveis de “fracturação fina” (valores em metros).

Em termos gerais, a proporção da fracturação respeitante à classe “sub-vertical” comparativamente com as demais classes é reduzida, situação que é de estranhar uma vez que a fracturação regional da área é maioritariamente de inclinação vertical a sub-vertical. Tal fica a dever-se às sondagens serem todas verticais sendo, por sua vez, muito provável, que as áreas do maciço classificadas como níveis de “fracturação fina” correspondam, na realidade, a fracturas ou falhas verticais que foram intersectadas pela furação. Estas falhas, ao induzirem efeitos de alteração elevados no maciço, mesmo em profundidade, poderão ser responsáveis, pelos em parte, pela dinâmica de escoamentos detectada neste maciço, uma vez que tais níveis podem surgir inesperadamente em profundidade, inseridos numa matriz rochosa praticamente sã, sendo a frequência de óxidos na “fracturação fina” muito mais elevada do que nas restantes classes - cerca de 80% das fracturas identificadas com óxidos encontram-se incluídas em níveis de “fracturação fina”, conforme a Figura 5.45. A proporção de óxidos nas demais famílias de fracturas é regularmente distribuída (Figura 5.45).



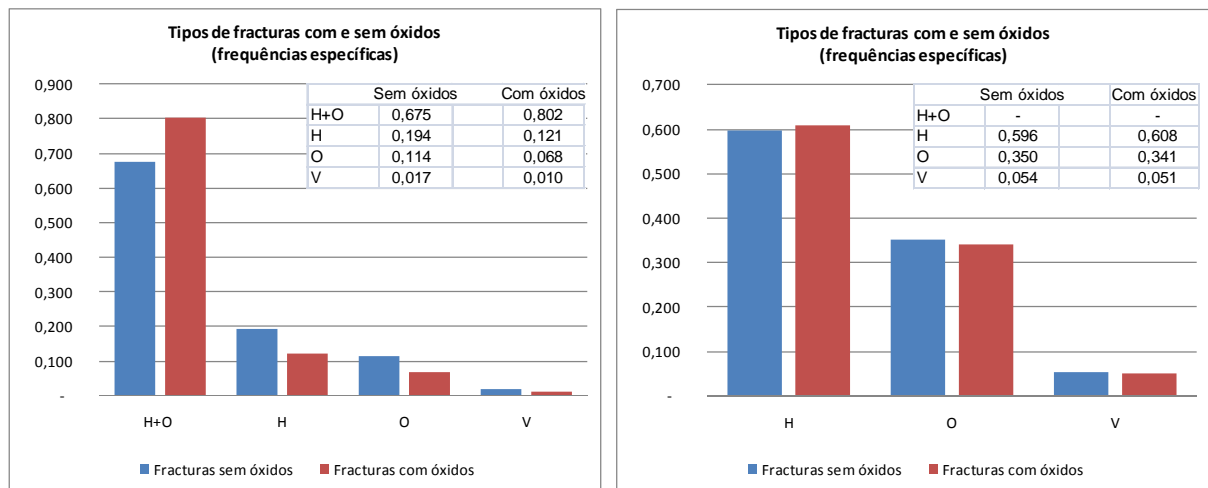


Figura 5.45. Frequências específicas de cada classe de acordo com a existência ou não de óxidos com contabilização de níveis de “fracturação fina” – à esquerda – e sem contabilização de níveis de “fracturação fina” – à direita (“H+O” – fracturação fina”; “H” – fracturação sub-horizantal; “V – Fracturação sub-vertical”; “O – fracturação oblíqua”).

A presença de óxidos nas fracturas (Figura 5.46 e Figura 5.47) é mais frequente na fácies de “Granito Porfíróide” (furo PP5B) comparativamente com o “Granito Biotítico” (furos PP3B e PP6B) ocorrendo, igualmente, maiores frequências de facturas com óxidos nas áreas Nordeste (furo PP2B) e central, esta correspondente aos “Micaxistos” e “Migmatitos”, estes comumente designados por diversos autores como “Xistos Ferríferos”, onde os óxidos de ferro podem ser consequência dos efeitos naturais da mineralização (por alteração da mica férrica predominante nestas fácies metamorfizadas – biotite).

Um outro aspecto interessante e de relevar é o de algumas aparentes relações entre tipos litológicos distintos e as famílias de inclinação estabelecidas. Conforme a Figura 5.48 observa-se:

- A maior predominância de fracturas horizontais no “Pegmatito” sendo de referir que na região é frequente a existência de Pegmatito instaurados por injeção lateral;
- A maior predominância de fracturação oblíqua nas fácies de “Micaxistos” e “Migmatitos” comparativamente com as demais litologias, nomeadamente as dos Granitos (Porfíróide e Biotítico), em que predomina a “fracturação fina” (sub-vertical) e horizontal;
- A maior frequência de “fracturação fina” nas áreas da Brecha Granítica.

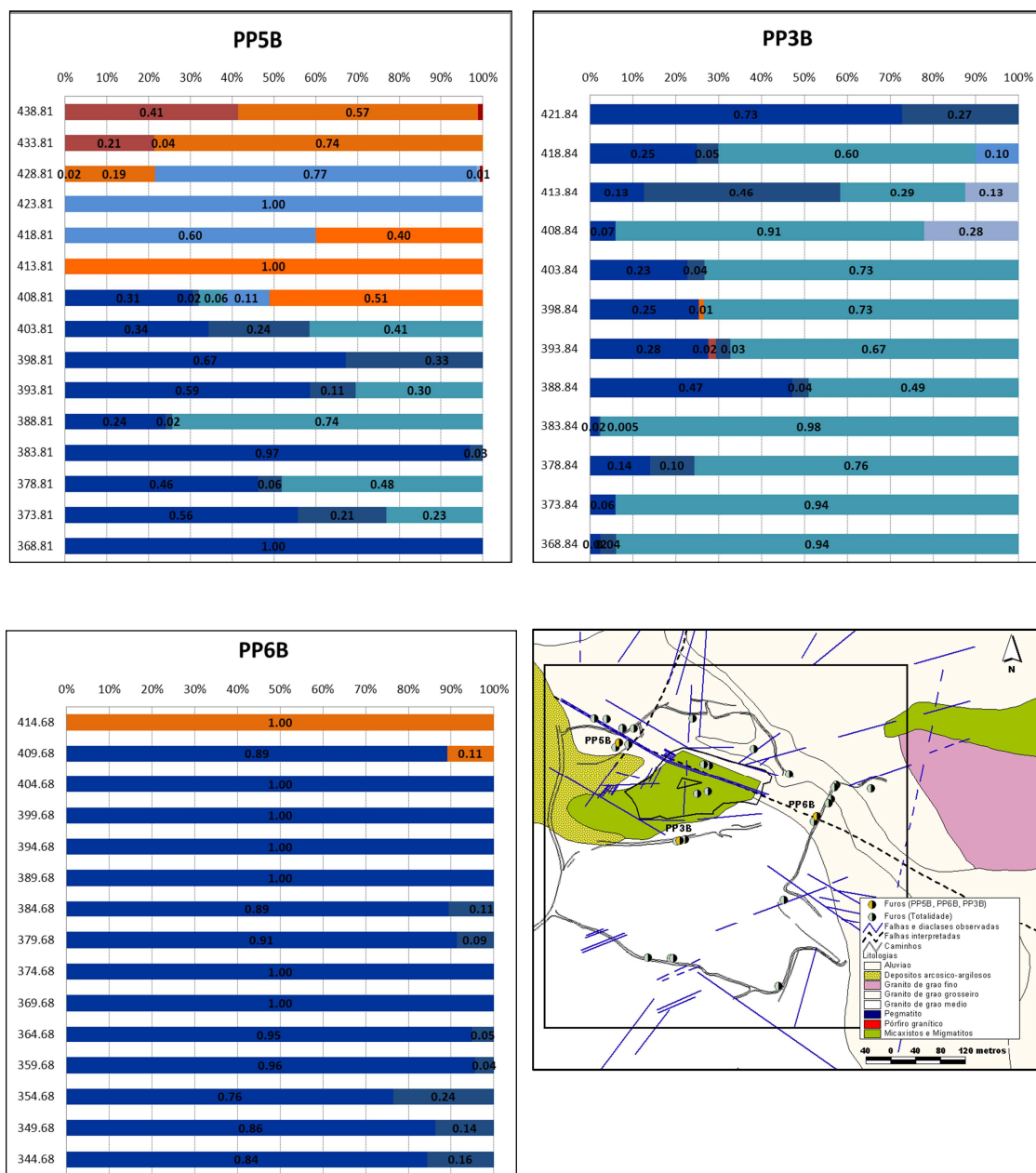


Figura 5.46. Frequências relativas, por intervalos de profundidade, das fracturas com óxidos (indicadas a cor vermelha e laranja) e sem óxidos (indicadas em tons de azul) detectadas em testemunhos de sondagem dos furos PP5B, PP3B e PP6B.

# CASO DE ESTUDO PARTE I: MODELAÇÃO 3D DAS LITOLOGIAS, ALTERAÇÃO, LIMONITIZAÇÃO E FRACTURAÇÃO

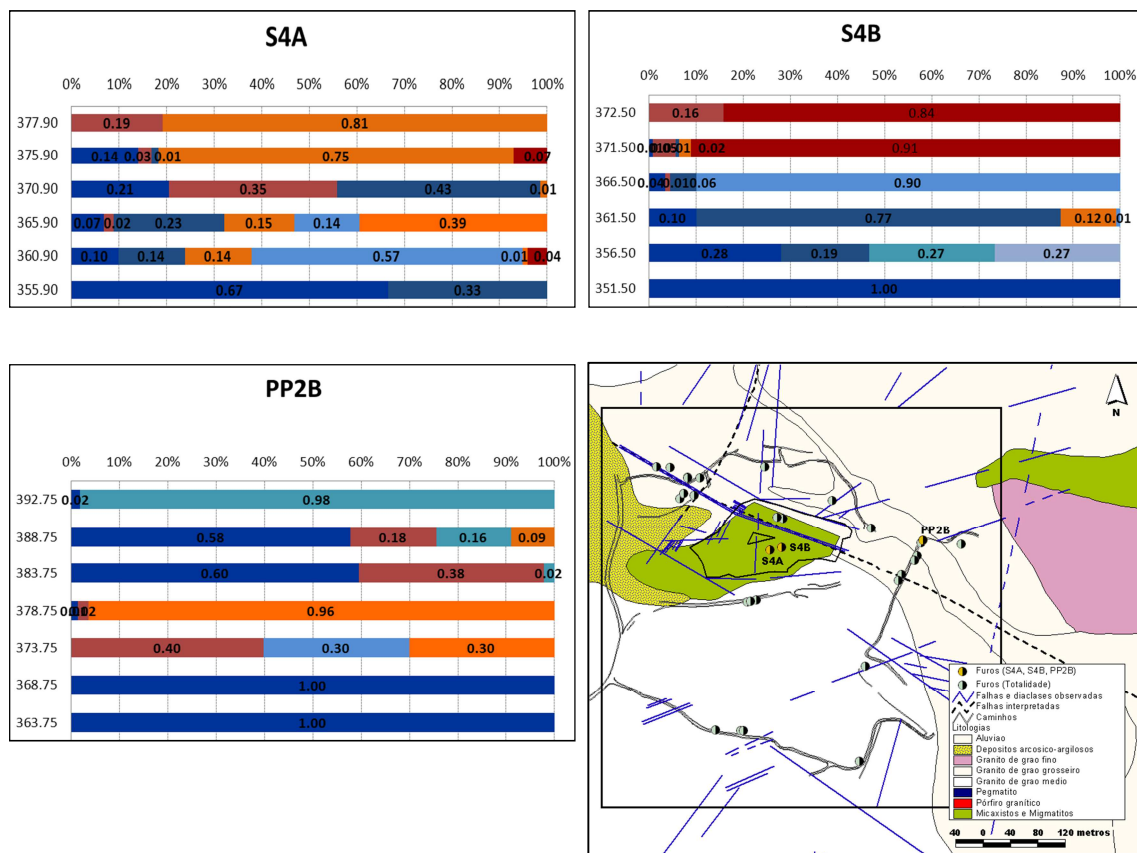


Figura 5.47. Frequências relativas, por intervalos de profundidade, das fracturas com óxidos (indicadas a cor vermelha e laranja) e sem óxidos (indicadas em tons de azul) detectadas em testemunhos de sondagem dos furos S4A, S4B e PP2B.

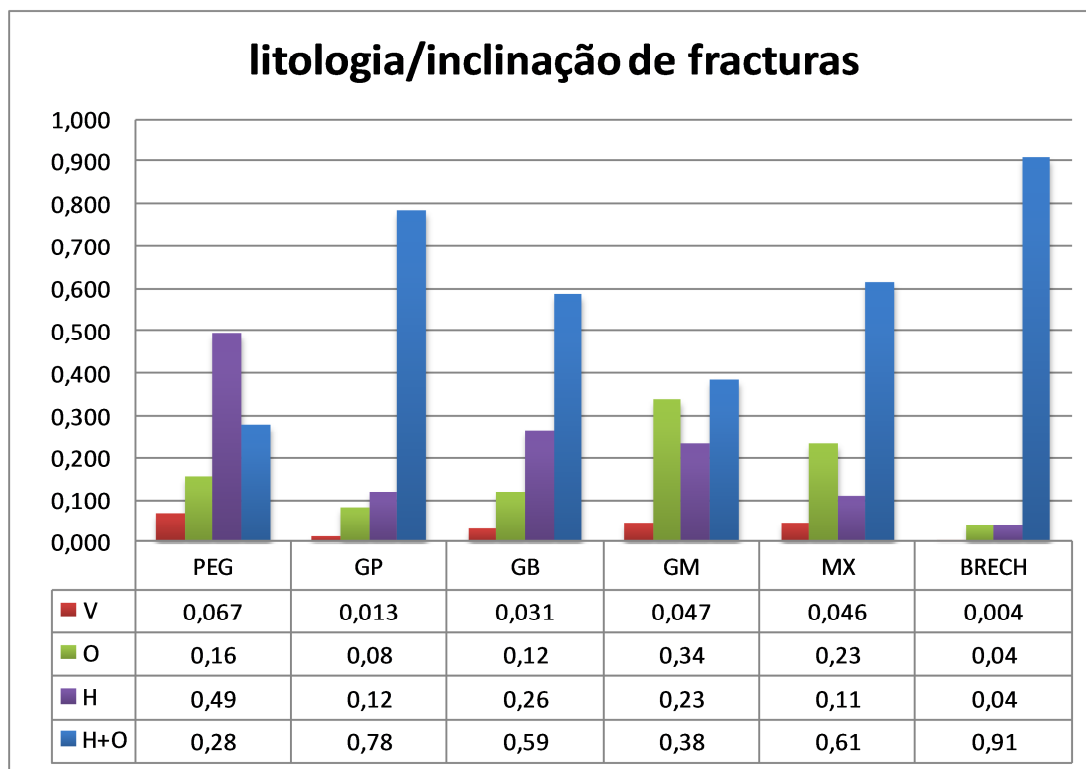
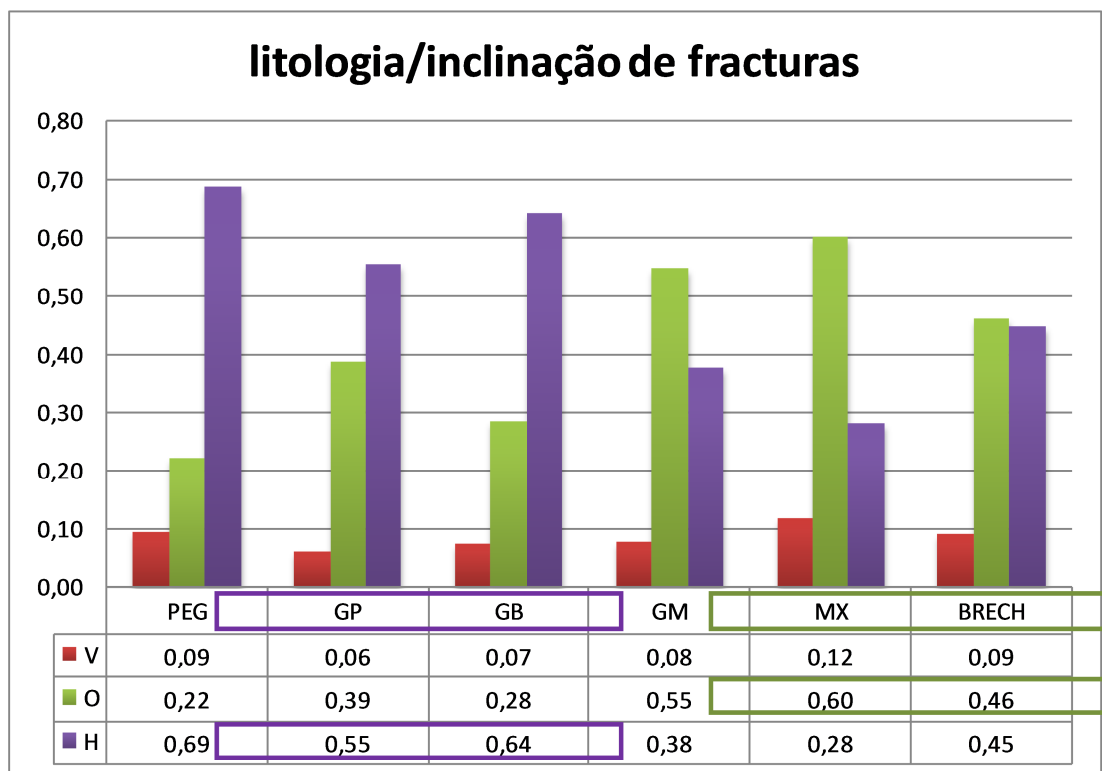


Figura 5.48. Frequências das famílias de inclinação por tipos litológicos (“H+O” – fracturação fina; “H” – fracturação sub-horizantal; “V” – Fracturação sub-vertical; “O” – fracturação oblíqua; “PEG” – Pegmatito; “GP” – Granito Porfíroide; “GB” – Granito Biotítico; “GM” – Migmatito; “MX” – Micaxisto; “BRECH” – Granito Brechificado).

O facto das sondagens disponíveis para os levantamentos de detalhe sobre a fracturação não terem sido executadas com recuperação integral dos testemunhos, e porque na fase de execução não foi realizado o levantamento das atitudes dos testemunhos recuperados (direcção + inclinação) com posterior levantamento das fracturas intersectadas, as observações e respectiva representatividade devem ser interpretadas com ponderação e cautela.

Efectivamente, para além de não ser possível efectuar uma classificação por atitudes das fracturas, as características “grau de abertura” e “tipo e existência de preenchimento” não se encontram totalmente salvaguardadas, não obstante, tenham sido avaliadas e ponderadas tais características, com alguma margem de razoabilidade.

Assim, e com as necessárias reservas, é de se esperar que a proporção de fracturas existentes no maciço sem preenchimento seja a mais significativa (Tabela 5.12), embora haja que considerar algumas prováveis perdas que possam ter resultado em consequência do processo de furação. Igualmente, as situações onde aparentemente as aberturas são superiores a 1 mm serão menos usuais, devendo este limite de “1 mm” ser considerado com as devidas ressalvas (Figura 5.49).

Tabela 5.12. Frequências relativas das fracturas de acordo com as características “inclinação”, “preenchimento” e “abertura”.

<b>Família (inclinação)</b>	<b>P1 (sem preenchimento)</b>	<b>P2 (com preenchimento)</b>
<b>SV (1)</b>	0,05	0,04
<b>O (2)</b>	0,26	0,07
<b>SH (3)</b>	0,46	0,12
	<b>Ab1 (Abertura &lt;1mm)</b>	<b>Ab2 (Abertura &gt;1mm)</b>
<b>SV (1)</b>	0,07	0,02
<b>O (2)</b>	0,25	0,09
<b>SH (3)</b>	0,50	0,08

	<b>Ab1 (Abertura &lt;1mm)</b>	<b>Ab2 (Abertura &gt;1mm)</b>
<b>P1 (s/)</b>	0,62	0,19
<b>P2 (c/)</b>	0,15	0,04

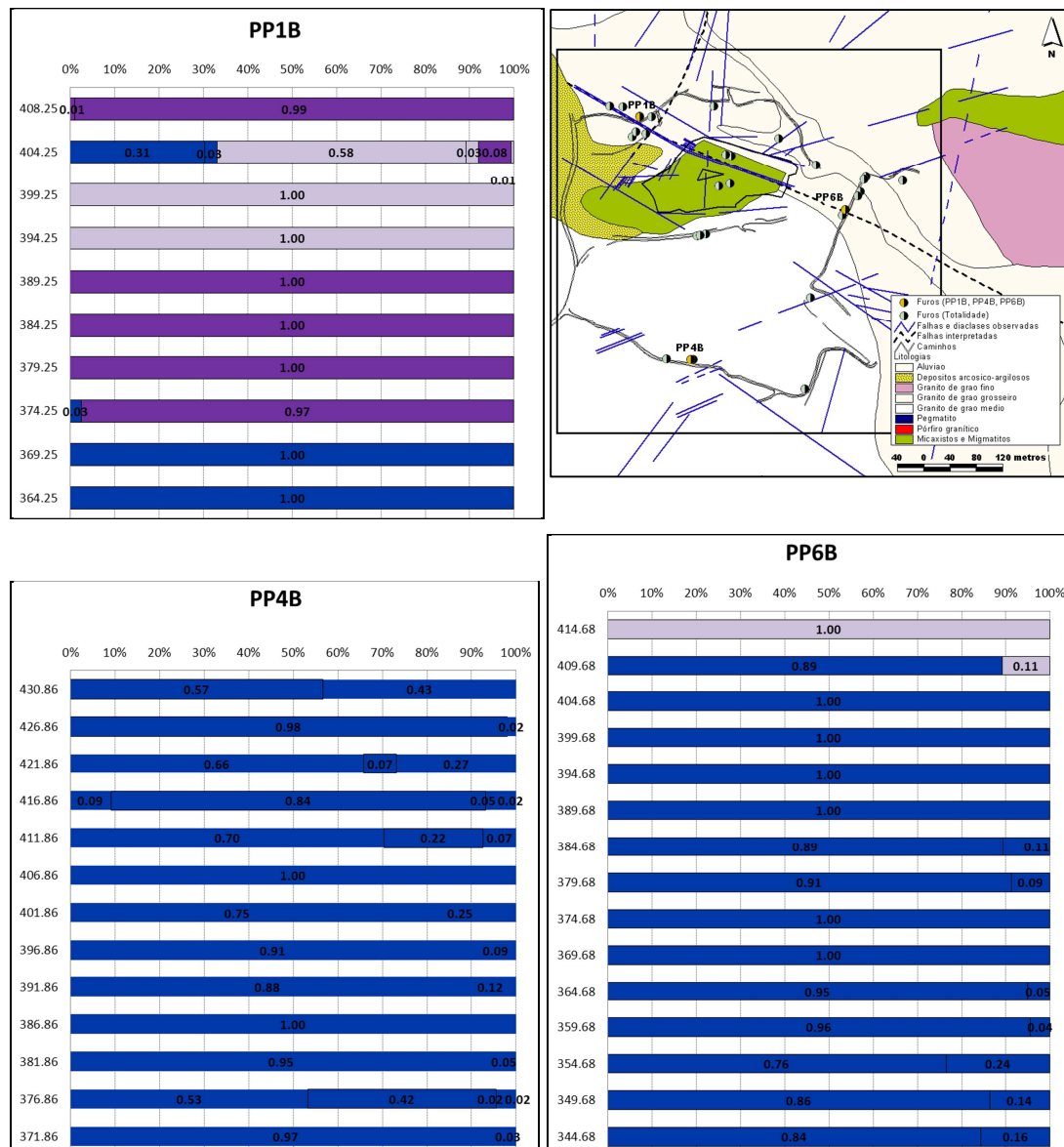


Figura 5.49. Frequências relativas, por níveis de profundidade, das fracturas sem preenchimento ( indicadas a cor azul) e com preenchimentos (indicadas a cor roxa e lilás) detectadas em testemunhos de sondagem dos furos PP1B, PP4B e PP6B.

### 5.4.2 CONVERSÃO 1D PARA 3D DA DENSIDADE DE FRACTURAÇÃO

A simulação 3D dos modelos de fracturação seguiu as seguintes duas fases sequenciais:

- Numa primeira fase, com o programa FTRIAN, simularam-se redes de fracturas aproximadas num bloco de referência com as mesmas dimensões do modelo de blocos (ou seja,  $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$ ). Este procedimento permitiu inferir qual o número de fracturas a inserir num volume que tenham a mesma correspondência com os valores medidos nas sondagens. As dimensões das fracturas seguiram uma lei estatística de potência de -2 (*power model*).
- Seguidamente, simularam-se por SSD modelos 3D da variável *Número de fracturas*, com condicionamento aos histogramas locais resultantes da simulação da variável *Alteração*.

As fracturas preenchidas foram tratadas na modelação da fracturação como não existentes. Para relacionar o *Número de fracturas* (aparentemente “sem preenchimentos”) com os restantes atributos geológicos foram calculados histogramas cumulativos condicionais por litologia (apenas para as duas mais representativas mais representativas, Granito porfiróide e Granito biotítico), para as três classes de alteração “W1”, “W2” e “W3” e para as duas classes de *Limonitização* (Figura 5.50). As discriminações encontradas consideram adequado simular a variável *Número de fracturas* com condicionamento apenas à variável *Alteração*, que é onde se observa maior discriminação.

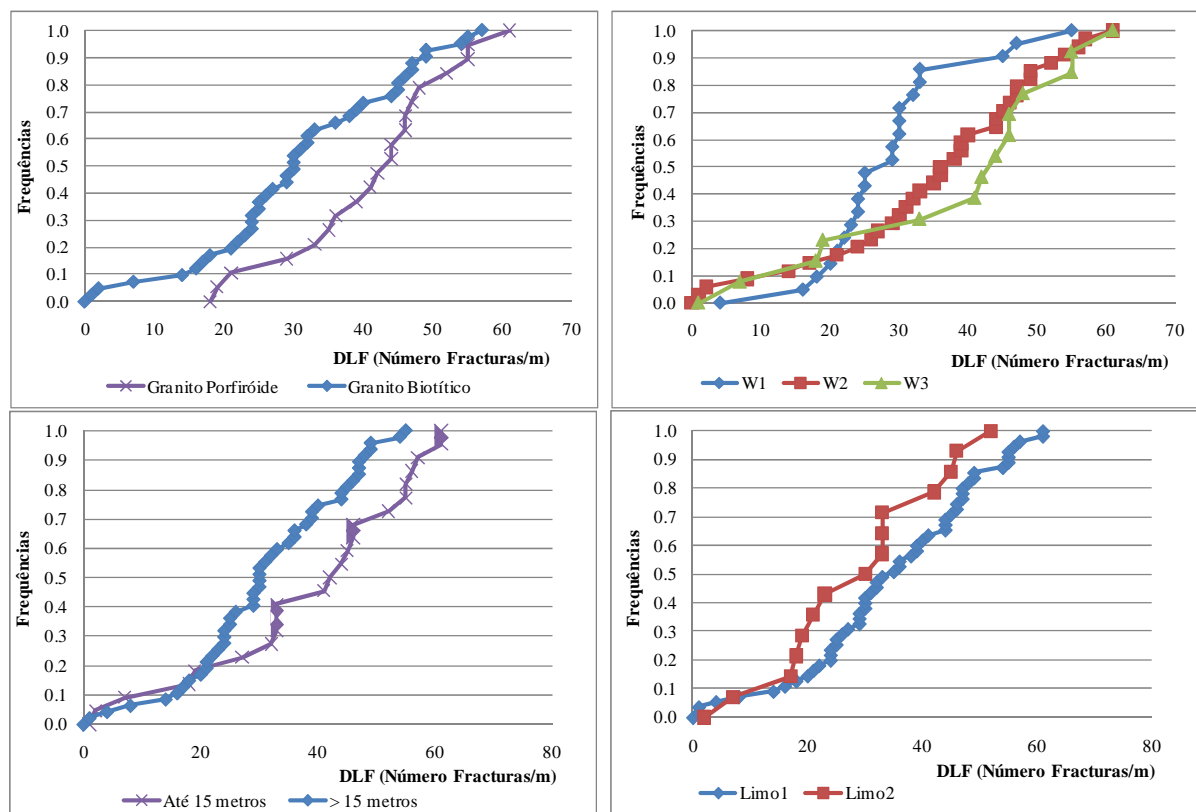


Figura 5.50. Histogramas cumulativos da Densidade Linear de Fracturação (DLF) em função das litologias predominantes (Granito Porfiróide e Granito Biotítico), graus de alteração, efeitos de limonitização e profundidade definida em função do nível dos 15 metros.

A simulação da fracturação tridimensional em blocos 3D de 5 metros respeitou os seguintes pressupostos:

- Foi considerado o tratamento para o somatório de todas as famílias classificadas de acordo com a inclinação em virtude da impossibilidade de se determinar a atitude das fracturas que as sondagens intersectaram;
- O tratamento foi realizado considerando o somatório das três famílias de fracturas - verticais, horizontais e oblíquas – uma vez que as proporções entre o número de famílias horizontais e oblíquas é muito próximo, podendo-se, assim, considerar existir proximidade

em quantidade no número de fracturas verticais, isto, apesar das quantidades medidas desta família serem sempre em número inferior, uma vez que as sondagens realizadas foram todas verticais.

- A dimensão das fracturas variou entre 10cm (menor dimensão capturada por uma sondagem) e 5m (dimensão do bloco);
- As fracturas foram aproximadas por quadrados cujas áreas seguem uma lei de distribuição tipo potência função do comprimento dos lados (Figura 5.51).

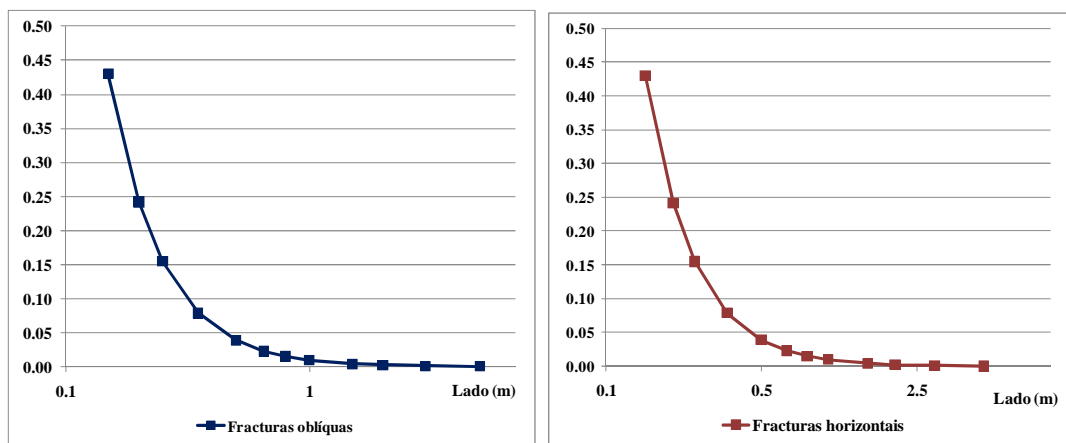


Figura 5.51. Lei de potência  $aL^e$  (em que  $a=1$ ,  $e=-2$ ), com  $L$  a variar de 10 cm (medida mínima das observações) a 5 metros.

Foram simuladas fracturas no FTRIAN considerando-se o somatório de todos os dados de fracturação existentes, com rotações completas, ou seja, usando-se o espectro total de atitudes possíveis, direcções de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  e inclinações de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , e considerando-se o somatório de todas as famílias de fracturas intersectadas (H,O,V) pelos scanlines 1D de 5 metros amostrais. Face ao valor máximo de DLF observados nas sondagens, a simulação reportou resultados a cada 1000 fracturas, tendo-se parado a simulação nas 37000 fracturas. As correspondências obtidas constam na Figura 5.52 e a representação dos resultados obtidos são apresentados na Figura 5.53.



DLF 5m	NF 5x5x5 m <sup>3</sup>
0.00	0
0.20	553
0.40	1105
0.80	2169
1.40	3620
1.60	4117
2.80	7367
3.20	8380
3.40	8825
3.60	9252
3.80	9669
4.00	10101
4.20	10593
4.40	11105
4.60	11702
4.80	12287
5.00	12860
5.20	13399
5.40	13927
5.80	14748
6.00	15134
6.20	15496
6.40	15858
6.60	16257
7.00	17098
7.20	17505
7.60	18308
7.80	18700
8.00	19073
8.20	19386
8.40	19698
8.80	20593
9.00	21175
9.20	21777
9.40	22241
9.60	22623
9.80	23009
10.40	24681
10.80	25667
11.00	26183
11.20	26682
11.40	27137
12.20	29105

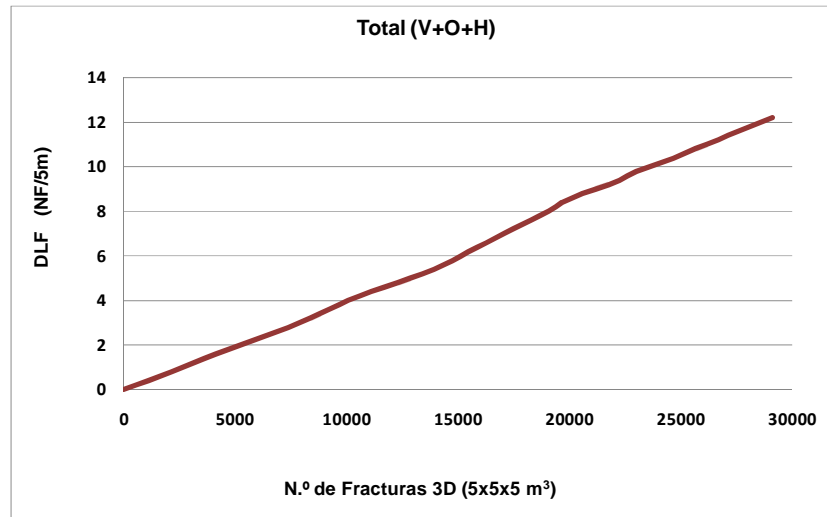


Figura 5.52. Tabela e gráfico que reportam a correspondência entre os valores da DLF 1D (5m) em Número de fracturas 3D num bloco com 5x5x5 m<sup>3</sup>.

Esta tabela de correspondências permitiu a conversão dos dados na localização da sondagem para os mesmos suportes de 5 metros que foram utilizados nas restantes variáveis. Os histogramas cumulativos da Figura 5.54 mostram a DLF a 1D e o resultado do Número de fracturas resultante por grau de Alteração. Dada a relação linear resultante da consideração de uma única família de fracturação, os histogramas têm a mesma forma mas reportam a quantitativos 1D e 3D respectivamente.

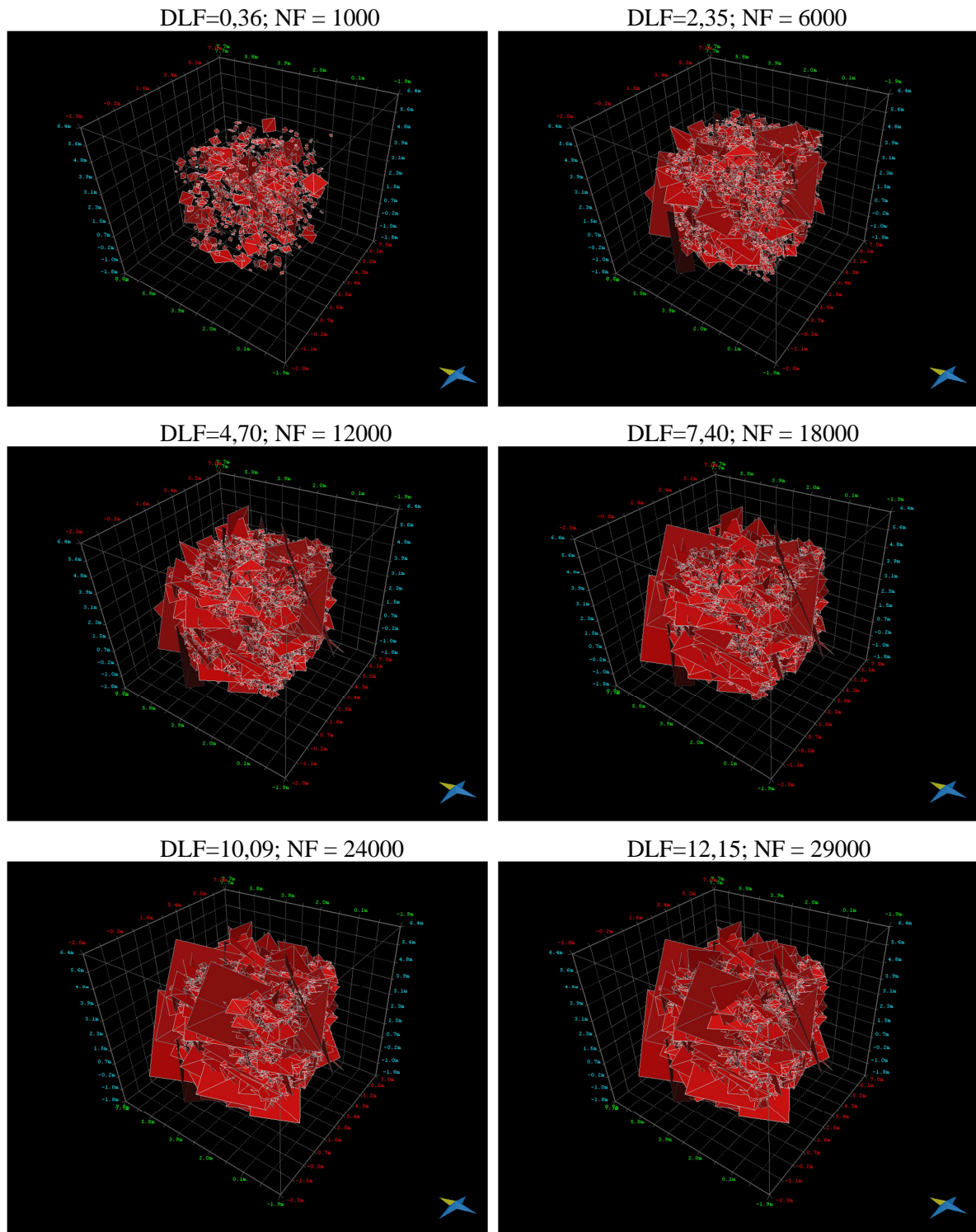


Figura 5.53. Visualização de resultados da simulação de 1000, 6000, 12000, 18000, 24000 e 29000 fracturas num cubo de dimensão 5x5x5 m<sup>3</sup> (MOVE® 2012.1).

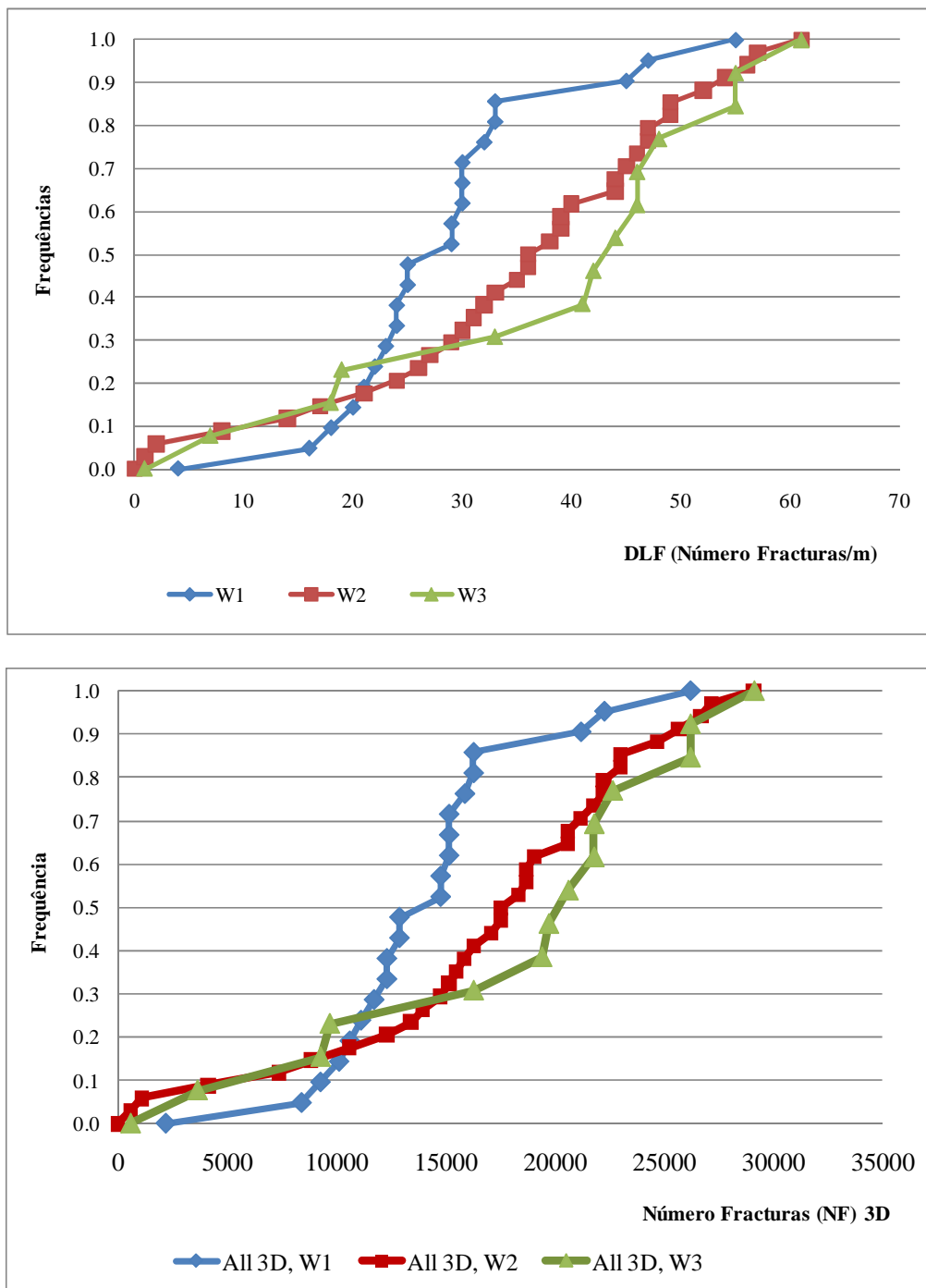
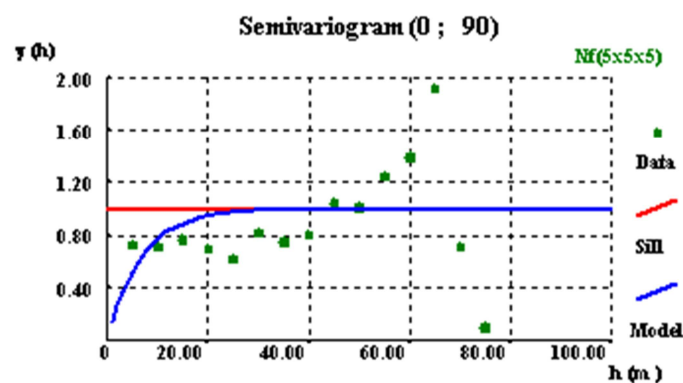


Figura 5.54. Histogramas da DLF 1D e do Número de Fracturas a 3D condicionado às alterações W1, W2 e W3.

### 5.4.3 SIMULAÇÃO 3D DA DENSIDADE DE FRACTURAÇÃO

A variável *Número de fracturas* foi simulada com a SSD com condicionamento a médias e histogramas locais por grau de *Alteração*. O *Número de fracturas* para a classe de alteração W4 foi igual a zero. Geraram-se 3 cenários desta variável, por cada grupo de 5 simulações anteriormente geradas da *Alteração* para cada uma das 20 imagens simuladas da Litologia o que perfaz um total de 300 imagens equiprováveis do *Número de fracturas*.

Previamente calcularam-se variogramas desta variável. Apenas foi possível ajustar um variograma teórico para a direcção vertical, com amplitude de 20 metros (Figura 5.55). Os variogramas confirmam a elevada heterogeneidade desta variável, onde é de esperar comportamento isotrópico. Por essa razão, e dada as menores distâncias entre as sondagens, não aparecem pontos do variograma experimental abaixo do patamar.



(Modelo: exponencial;  $C=0,42$ ;  $a_H=a_V=20$  m;  $r=1$ )

Figura 5.55. Ajustamento do variograma experimental da direcção vertical para a densidade de fracturação a um modelo exponencial, isotrópico, de amplitude 20 metros.

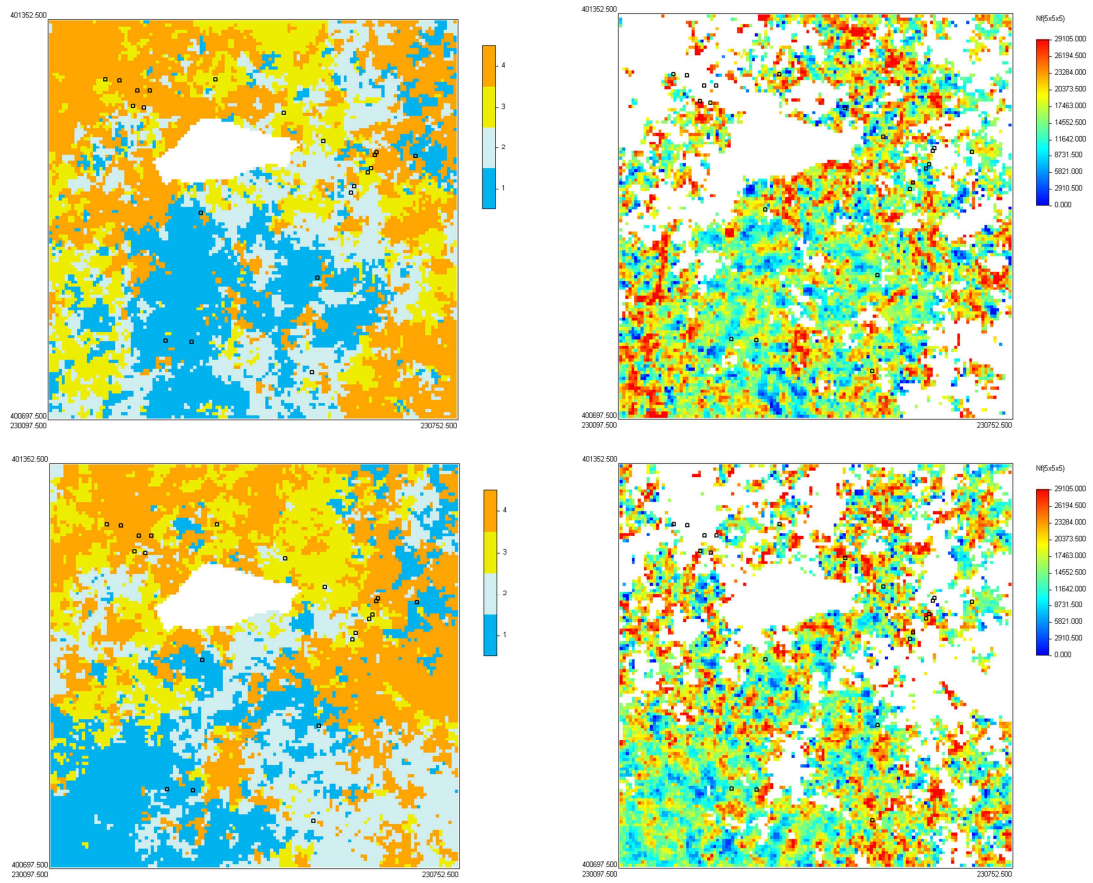


Figura 5.56. À direita: imagens simuladas do Número de Fracturas 3D em células unitárias de  $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$  (Plano XY, Z=387,5m). À esquerda: imagens simuladas homólogas da alteração onde (1) Maciço inalterado, rocha sã (2) Maciço pouco alterado (3) Maciço alterado e (4) Maciço muito alterado, decomposto.

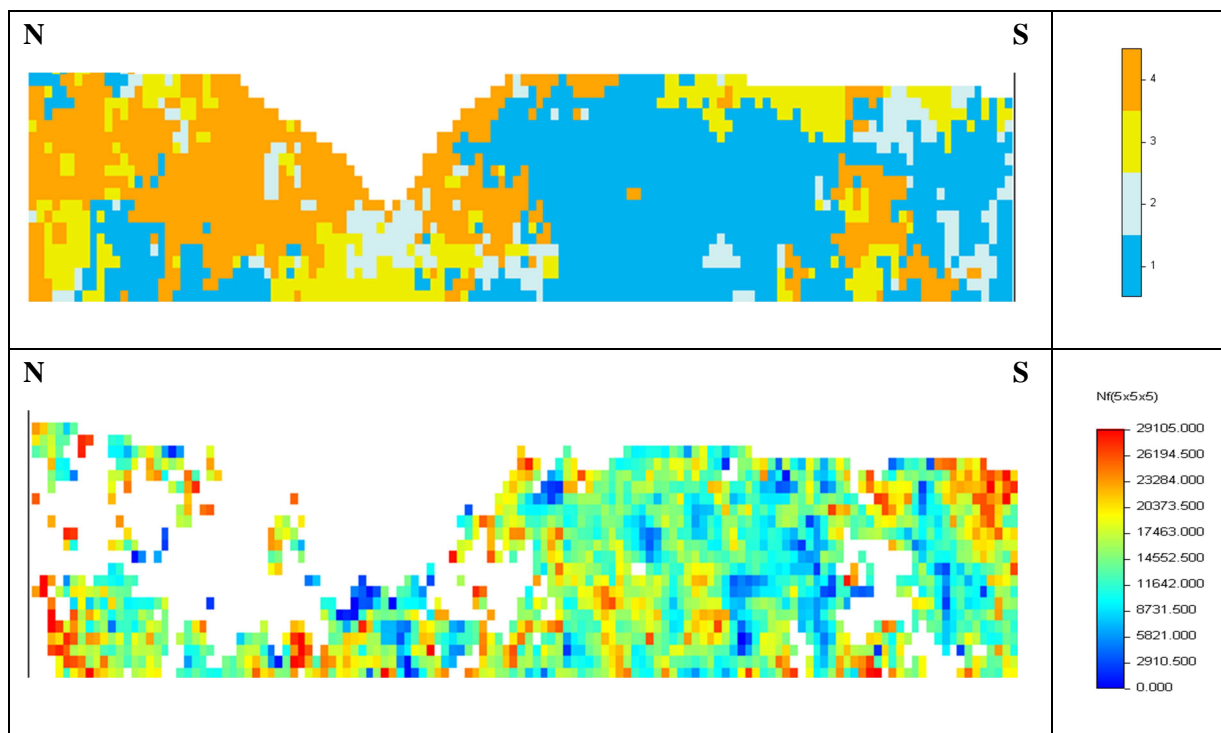


Figura 5.57. Comparação entre imagem simulada do grau de alteração e correspondente imagem simulada do Número de Fracturas 3D em células unitárias de 5x5x5 m<sup>3</sup> (Plano YZ, X=230300m). (1) Maciço inalterado, rocha sã (2) Maciço pouco alterado (3) Maciço alterado e (4) Maciço muito alterado, decomposto; NF – Número de Fracturas 3D.

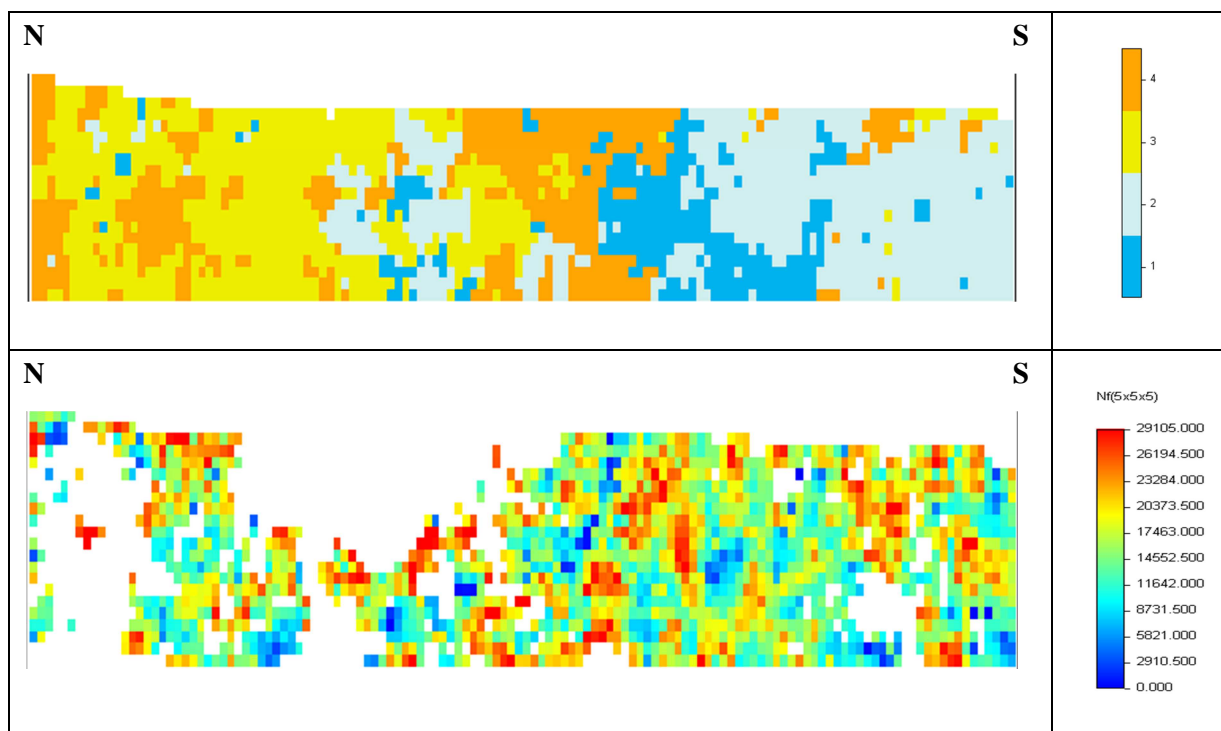
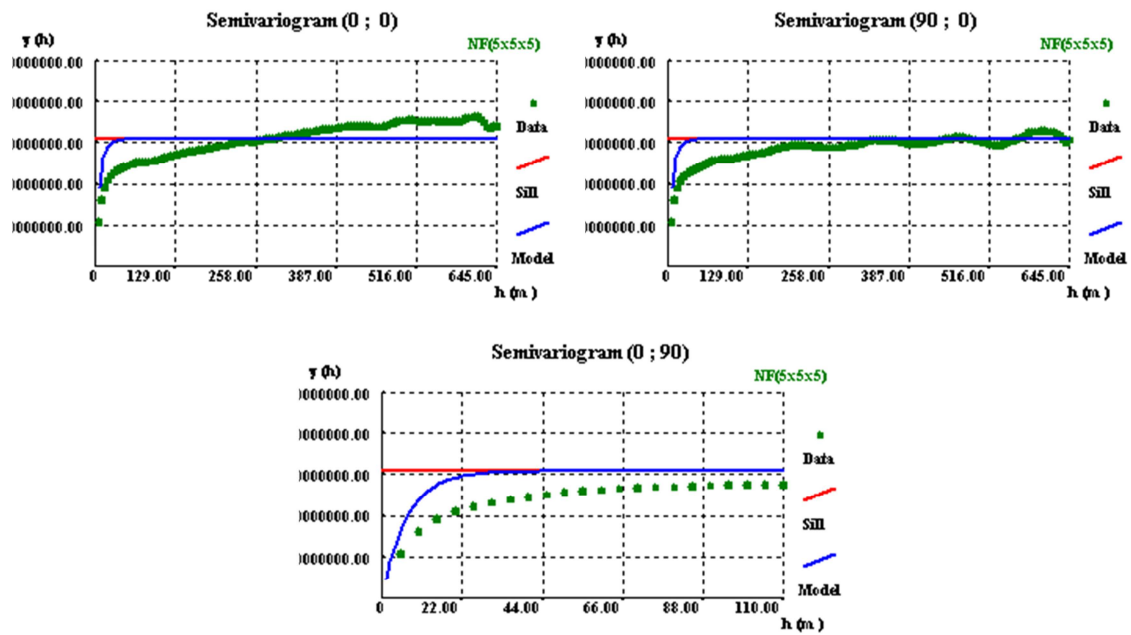


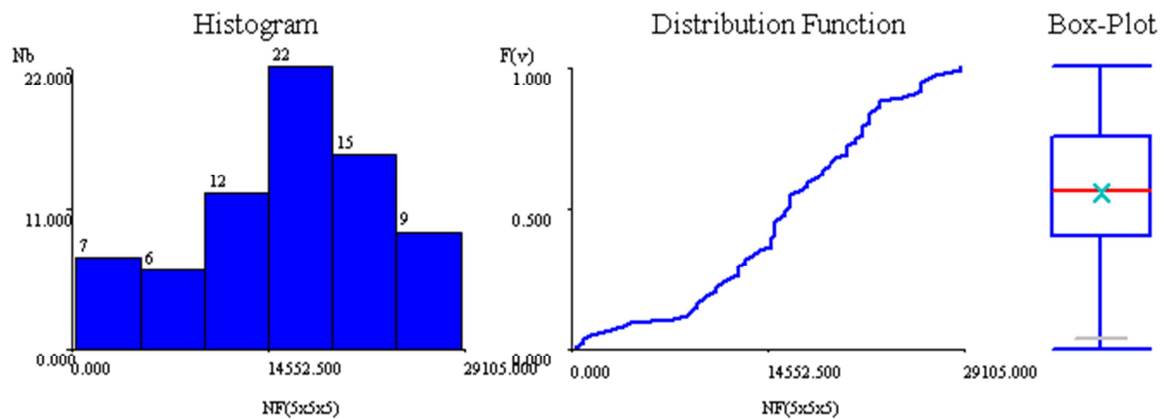
Figura 5.58. Comparação entre imagem simulada do grau de alteração e correspondente imagem simulada do Número de Fracturas 3D em células unitárias de 5x5x5 m<sup>3</sup> (Plano YZ, X=230500m). (1) Maciço inalterado, rocha sã (2) Maciço pouco alterado (3) Maciço alterado e (4) Maciço muito alterado, decomposto; NF – Número de Fracturas 3D.





(Modelo: exponencial;  $C=0,42$ ;  $a_H=a_V=20$  m;  $r=1$ )

Figura 5.59. Variogramas do Número de Fraturas 3D (em células unitárias de  $5 \times 5 \times 5$  m<sup>3</sup>) de uma imagem simulada obtida por SSD.



#### UNIVARIATE STATISTICS

Samples : 71	Minimum : 0.000	75 Perc : 21777.000	ANOMALOUS
Mean : 16022.620	5 Perc : 1105.000	85 Perc : 23009.000	Large Maximum : 46482.000
Variance : 50279100.000	15 Perc : 9252.000	95 Perc : 26682.000	Minimum : -13968.000
St. Dev. : 7090.7757	25 Perc : 11702.000	Maximum : 29105.000	Small Maximum : 31369.500
Coef.Var. : 0.4425	Median : 16257.000	Coef. Skewness : -0.3819	Minimum : 1144.500

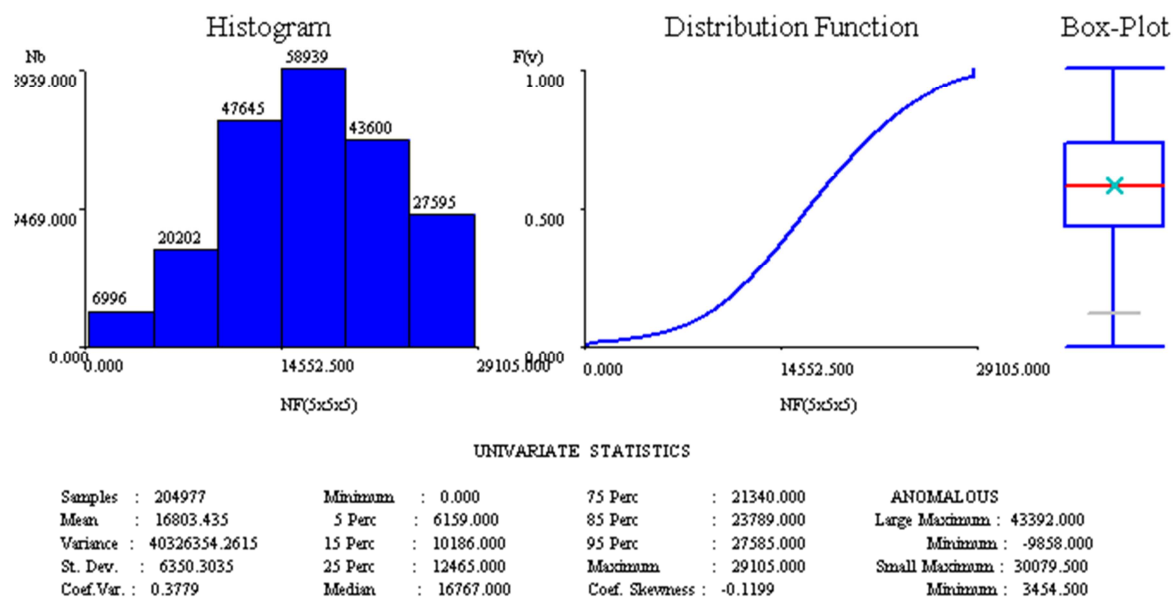


Figura 5.60. Comparação entre os histogramas da DLF a 1D e um das 300 imagens equiprováveis simulações do Número de Fracturas 3D geradas por SSD.

A análise variográfica dos resultados (Figura 5.59) e das imagens simuladas (Figura 5.56 a Figura 5.58) evidencia um fenómeno importante de reportar: o da existência de efeitos de zonalidade que resultam do condicionamento efectuado à *Litologia* e à *Alteração*. A distribuição espacial do Número de Fracturas de cada bloco que compõe a GRID dos modelos simulados encontra-se, pois, fortemente condicionada por estas duas variáveis o que se repercute na existência destes efeitos de zonalidade, já anteriormente referidos, e particularmente denotados na simulação SIS da variável categórica “Litologia”.

O condicionamento aos histogramas da Alteração e, indirectamente, da litologia e profundidade, encontra-se patente nas imagens simuladas. Este aspecto é muito relevante para a fase subsequente, de conversão dos modelos 3D de fracturação em modelos 3D de transmissividade, uma vez que, conforme se constata da análise de ensaios de bombagem nos furos e piezómetros, existe uma relação bem demarcada entre os resultados de transmissividade, o tipo de litologia e o grau de alteração, com evidências de funcionamentos hidráulicos distintos entre as litologias “Granito Porfiróide” e “Granito Biotítico”, pressupostos que, deste modo, serão introduzidos nas matrizes do modelo de transmissividade.



## **6. CASO DE ESTUDO PARTE II: MODELAÇÃO DOS ATRIBUTOS HIDROGEOLÓGICOS**

### **6.1 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS DE BOMBAGEM**

#### **6.1.1 ENQUADRAMENTO E CONSIDERAÇÕES PRÉVIAS SOBRE A METODOLOGIA DE ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO ADOPTADA**

De acordo com Pereira e Almeida (1997) e Fialho *et al* (1998), o comportamento particular dos sistemas fracturados deriva fundamentalmente da existência de dois sistemas hidráulicos interactuantes: um com funções capacitivas, caracterizado por maior capacidade de armazenamento e menor transmissividade – sistema de blocos – e outro, com funções essencialmente transmissivas – sistema de fracturas – caracterizado por uma relação inversa daquelas propriedades.

Conforme Fialho *et al* (1998) nos maciços fracturados, a circulação da água faz-se através de poros intergranulares originais ou resultantes de efeitos de alteração, microfracturas, e, através de planos de descontinuidades - xistosidades e fracturas. Por esta razão é comum a recorrência a modelos que descrevem o escoamento em maior de “Porosidade Dupla”, em que se considera que a porosidade total do sistema será a que resulta da existência de dois tipos distintos de porosidade devidas aos blocos da matriz rochosa e às fracturas.

A relação entre o coeficiente de armazenamento e a permeabilidade entre os blocos e fracturas pode variar, dependendo de diversos factores como a litologia, a estado de alteração e as características da fracturação.

No exemplo concreto da área em estudo, e conforme se evidencia a partir dos resultados e possíveis interpretações realizadas verifica-se a existência de zonas, onde, os efeitos da alteração argilítica e sericítica induzidas por estruturas vão contribuir para a redução, por vezes, significativa, da permeabilidade não obstante o facto de estarmos na presença de zona de falha de dimensão regional. Noutros casos, a intersecção de sistemas altamente fracturas – como o caso de filões com quartzo ou brechas graníticas – podem induzir incrementos significativos nos valores de permeabilidade e/ou alterações bruscas no andamento dos rebaixamentos em função do tempo.

As interpretações de ensaios de bombagem em sistemas deste tipo por via dos métodos clássicos devem ser ponderadas e sujeitas sempre a uma análise crítica do significado dos resultados os quais, uma vez que os ajustamos dos dados observados (pares de valores tempo/rebaixamento) às respectivas curvas-padrão é difícil, e, na quase totalidade das situações, resultando, sempre, em situações que não são totalmente ajustáveis, pelo menos em determinadas etapas dos ensaios.

A existência de “heterogeneidades” nos sistemas em estudo é situação quase certa e de se esperar em virtude das modificações, por vezes bruscas em termos hidrodinâmicos, que reflectem mudanças e passagens para diferentes possíveis sistemas que se encontrem, de algum modo, espacialmente interligados (Figura 6.1).

Verifica-se, igualmente, a existência de “efeitos de barreira”, devidos a modificações nos sistemas e que induzem um aumento nos rebaixamentos, que evidencia maiores facilidades na propagação dos escoamentos devidas a possíveis diferentes situações como, por exemplo, a passagem para núcleos locais, substancialmente mais fracturados e cujas fracturas, de maior densidade, se apresentem mais conexas, mais abertas e/ou com percentagem de preenchimentos mais baixos ou de natureza mais arenosa.

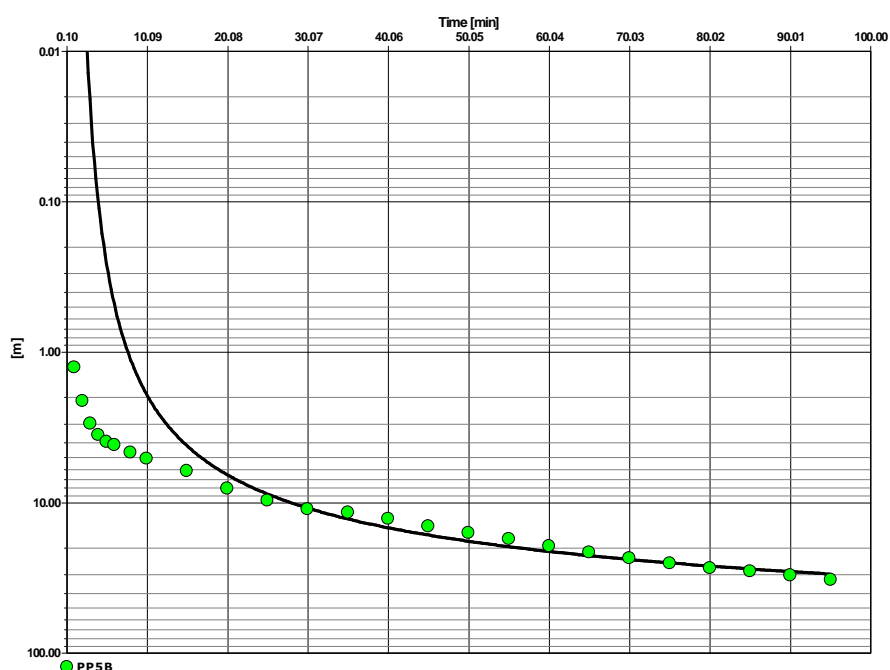


Figura 6.1. Exemplificação de ensaio com heterogeneidades realizado no furo de PP5B; intervalo de bombagem dos 0 até aos 100 minutos. Ajustamento à curva do modelo de “Theis com correcção de Jacob”.

Igualmente é sempre de ter em presença os designados “efeitos de pele” das fracturas e dos próprios poços e furos de observação conforme descritos por Moench (1984). Com efeito, os modelos que descrevem matematicamente os escoamentos entre blocos e fracturas baseiam-se, essencialmente, na hipótese da existência de um regime permanente ou um regime transitório entre os blocos e as fracturas. Na hipótese de regime permanente, considera-se o pressuposto da existência, por sua vez, do chamado regime de pseudo-equilíbrio, que resultada dum regime transitório para as fracturas e permanente para os blocos. A existência de um regime permanente nos blocos poderá ser explicada pela presença de uma película fina (“pele”) de material, de permeabilidade inferior á dos blocos e que

reveste a sua superfície, resultante da alteração da rocha ou da precipitação de minerais e que impede o fluxo livre entre os blocos e as fracturas, retardando a contribuição dos blocos. Por sua vez, a zona envolvente imediata aos poços e furos de observação e de bombagem são de características diferentes em termos de permeabilidade e transmissividade, em virtude dos efeitos de furação, injeção de lamas, métodos e materiais construtivos (“pele do poço”).

Ora, como frequentemente os meios de porosidade dupla têm uma produtividade baixa e a fracção de água extraída nos primeiros momentos da bombagem pode ser significativa, é usual desprezarem-se os valores de rebaixamento dos primeiros momentos, pelo seu significado enviesado, de baixa representatividade das características efectivas do sistema.

Pelas razões expostas, considerou-se ser mais ajustado, subdividir os ensaios globais por patamares, de acordo com os diferentes andamentos que se verificam nos rebaixamentos e que representarão, muito provavelmente, evoluções dinâmicas distintas, entre diferentes sistemas presentes na área em estudo. Os valores individualizados por grupos, respeitantes às observações de cada intervalo de bombagem estabelecido, foram, então, ajustados a curvas características dos modelos do tipo “Porosidade Dupla” e de “Theis com correcção de Jacob”. Em alguns destes intervalos associa-se os períodos de recuperação.

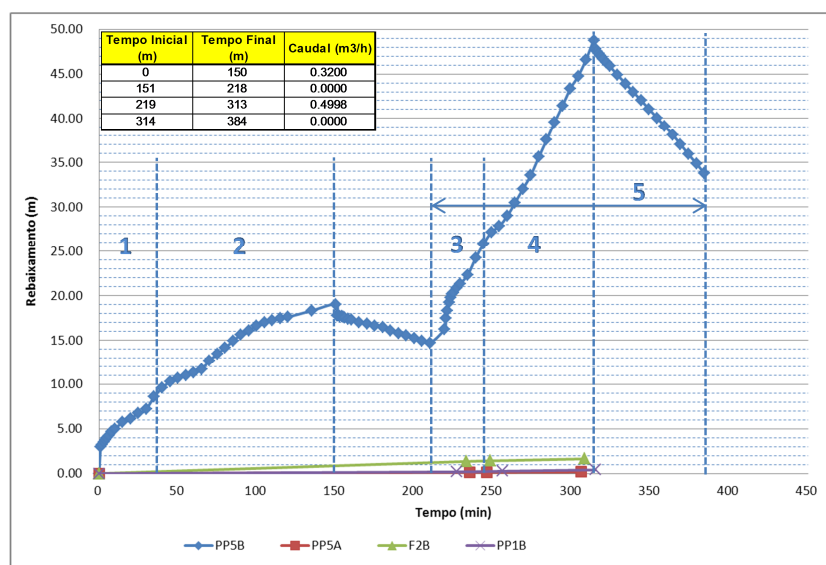


Figura 6.2. Condições gerais e faseamentos do ensaio de bombagem em PP6B.

A interpretação de resultados efectuou-se com recurso ao *software* AquiferTest v.4®, versão que se revelou bastante útil por possuir um módulo específico que permite interpretações de ensaios de bombagem de acordo com o modelo de “Porosidade Dupla” (Röhrich, 2005).

Principais pressupostos inerentes ao módulo:

1. Existência de um meio contínuo de baixa permeabilidade primária dada pela porosidade dos blocos e em que o fluxo dos blocos para as fracturas obedece a um regime pseudo-estacionário. As fracturas funcionam como um meio contínuo de alta permeabilidade secundária sendo o fluxo radial e o regime transiente (não-estacionário).
2. A matriz de fracturas funciona como um aquífero confinado e a matriz dos blocos é tratada como um aquícludo (constituindo, assim, uma fonte de água) sendo a espessura saturada a resultante do somatório da do aquífero com a do aquícludo.
3. Os efeitos destes dois meios contínuos sobrepõem-se.
4. A velocidade de escoamento entre a matriz e as fracturas ( $q_\alpha$ ) é directamente proporcional à condutividade hidráulica da matriz ( $K'_h$ ) e às diferenças entre as cotas piezométricas de cada um dos sistemas, ou seja,

$$q_\alpha = \alpha K'_h (h' - h)$$

em que  $\alpha$  é um coeficiente que depende da geometria dos blocos, medido pela superfície do bloco da matriz ( $A$ ), comprimento característico dos blocos ( $l$ ) e o volume da matriz ( $V$ ), da seguinte forma:

$$\alpha = \frac{A}{lV}$$

O coeficiente de armazenamento da matriz ( $S'_s$ ) é expresso por:

$$-q_\alpha = S'_s \frac{\delta h'}{\delta t}$$

5. A caracterização dos fluxos da matriz para as fracturas é expressa pelos parâmetros, coeficiente de fluxo inter-porosidade ( $\lambda$ ) que pode variar entre 0,0001 e 5, e o rácio entre os coeficientes de armazenamento específicos ( $\sigma$ ), que será sempre superior a 1:

$$\lambda = \frac{\alpha r^2 K'_h}{K_h}$$

em que  $r$  é a distância do poço de bombagem ao poço de observação;  $K'_h$  é a condutividade hidráulica da matriz e  $K_h$  a condutividade hidráulica das fracturas

$$\sigma = \frac{S'_s}{S_s}$$

Este módulo admite, igualmente, um funcionamento hidrodinâmico caracterizado, na globalidade, pelos seguintes três estádios:

1. Estádio Inicial, em que a água bombeada, induzindo acentuados rebaixamentos, provém do armazenamento das fracturas;
2. Estádio Intermédio, em que os escoamentos que se processam para o furo são já devidos à água que se começa a libertar da matriz, sendo, pois, os rebaixamentos mais pequenos quando comparados com os induzidos somente pelas fracturas;
3. Estádio Final, em que os rebaixamentos na matriz se aproximam aos das fracturas, o que significa que o sistema passará a funcionar de acordo com um modelo de porosidade simples, funcionando como um sistema único, em que as propriedades finais resultam de uma combinação das propriedades da matriz e da fractura, ou seja, existe uma combinação que permite uma aproximação à curva do modelo de “Theis”.

É de referir que nos casos de estudo ensaiados a proximidade entre resultados, obtidos em algumas situações, usando-se o método de “Theis com correcção de Jacob” e o método de “Porosidade Dupla” reflectem uma situação próxima à descrita em 3., ou seja, de funcionamento hidráulico segundo um modelo de porosidade simples, neste caso, devido à presença e influência preponderante de uma matriz “terrosa”, resultante de alteração, ou, devido a ligação hidráulica mais contínua que possa ser estabelecida entre dois ou mais meios distintos, situação mais usual em estádios dos ensaios de bombagem mais avançados (Figura 6.3).

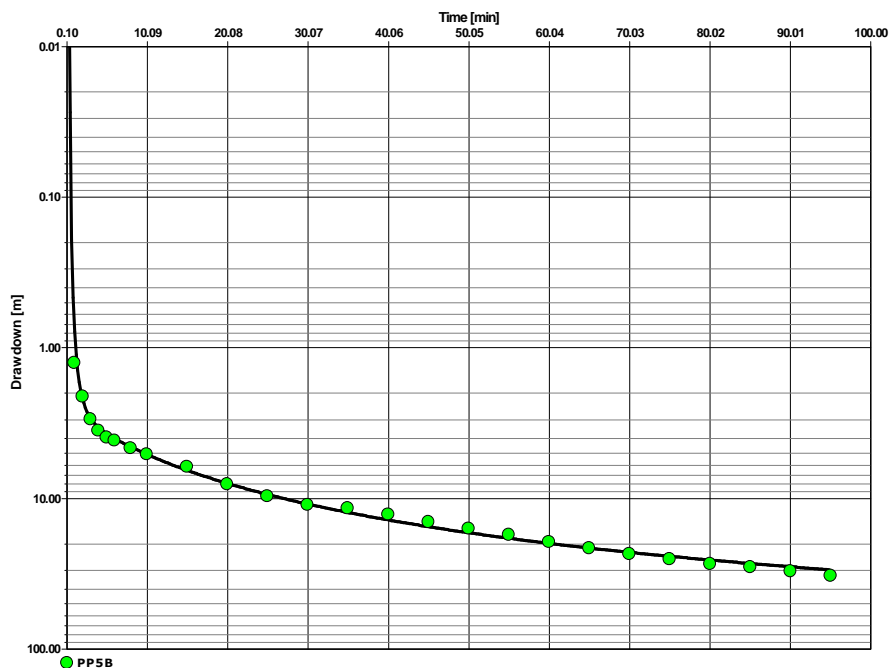


Figura 6.3. Interpretação dos rebaixamentos registados entre os 219 e os 314 minutos de bombagem no furo PP5B pelo método de dupla porosidade (provável “Estádio Final”, situação de equilíbrio);  $T(m^2/dia) = 1,85 \times 10^{-2}$ ;  $S = 1,22 \times 10^{-6}$ ;  $\sigma = 2,09 \times 10^1$ ;  $\lambda = 1,00 \times 10^1$ .

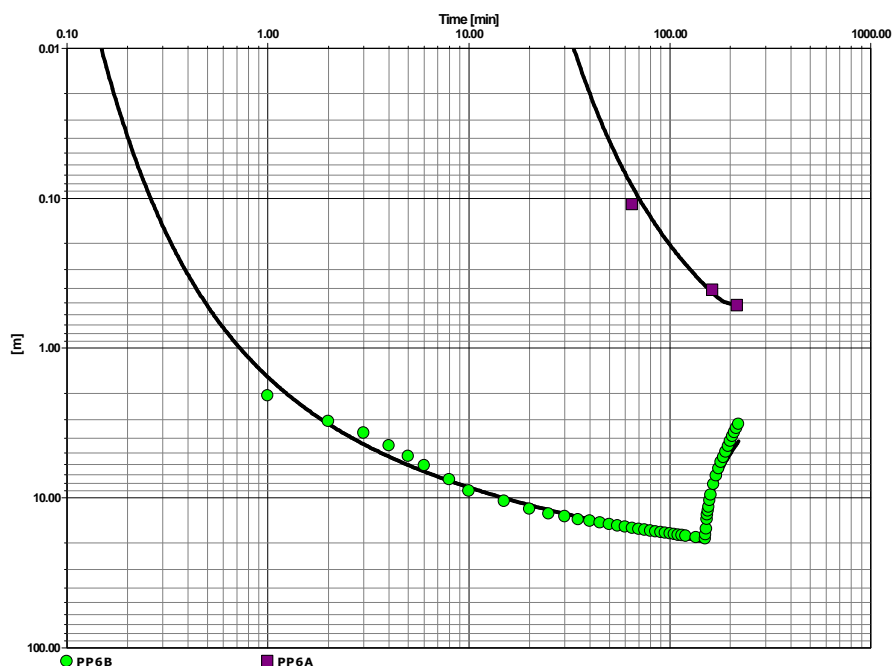


Figura 6.4. Interpretação dos rebaixamentos registados entre os 391 e os 611 minutos de bombagem nos furos PP6B e PP6A pelo método de dupla porosidade (provável “Estádio Final”, situação de equilíbrio), incluindo período de recuperação; Furo PP6B:  $T(m^2/dia) = 1,05 \times 10^0$ ;  $S = 1,84 \times 10^{-5}$ ; Furo PP6A:  $T(m^2/dia) = 3,56 \times 10^0$ ;  $S = 8,39 \times 10^{-3}$ .

### 6.1.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS ENSAIOS REALIZADOS

No decorrer das duas campanhas de sondagens e de instalação de piezómetros efectuadas em 2007 e 2008 foram realizados ensaios de bombagem.

Relativamente a ambas as campanhas seleccionaram-se as observações que efectivamente poderão ter representatividade e sobre estas realizou-se uma interpretação de resultados com recurso ao *software* AquiferTest v.4® (Röhrich, 2005). Nos ajustamentos dos conjuntos das observações consideraram-se os modelos de “Porosidade Dupla” e de “Theis com Correção de Jacob”.

Na campanha de 2007, em que foram executados os piezómetros, PP5A, PP5B, PP6A e PP6B, um dos objectivos principais dos ensaios de bombagem era o de se poder determinar as condições de Transmissividade associadas à estrutura principal que intersecta a área mineira. Nesta campanha, os ensaios foram realizados a caudal variável, intercalados por períodos de recuperação nos furos PP5B e PP6B e a caudal constante nos furos PP5A e PP6A com recuperação. Os furos mais profundos, PP5B e PP6B, possuem tubo crepinado apenas na parte subjacente à do granito mais alterado (ou seja, sensivelmente abaixo dos 25/30 metros de profundidade), enquanto que os furos PP5A e PP6A encontram-se abertos em toda a extensão do granito mais alterado.

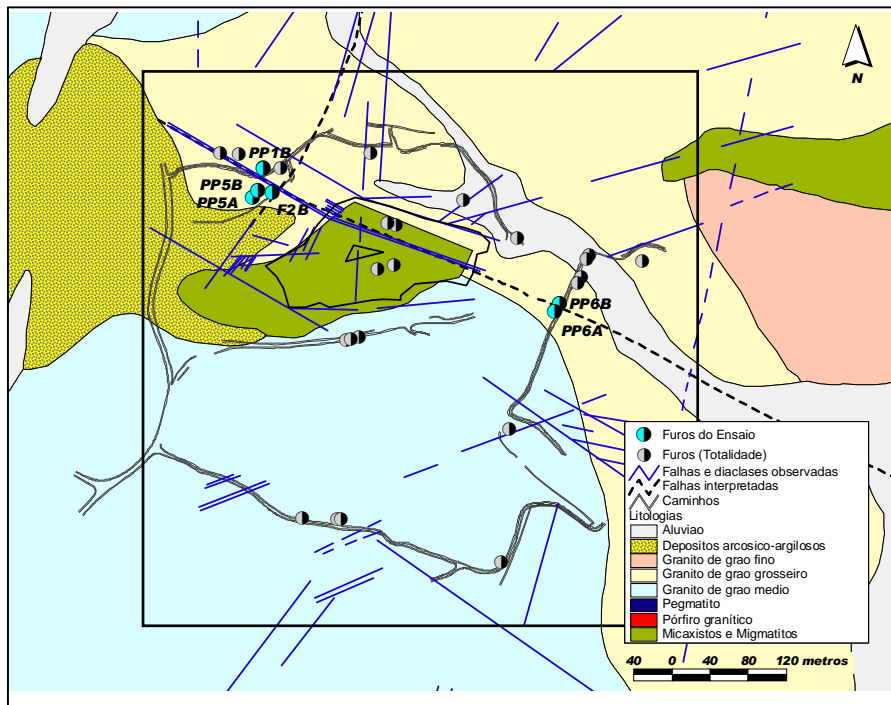


Figura 6.5. Enquadramento litológico-estrutural dos furos da campanha de 2007: PP5A, PP5B, PP6A e PP6B.

Das observações disponíveis foram poucas as situações que vieram a ser aproveitadas e seleccionadas para posterior tratamento (Tabela 6.1) sendo que referir que, na grande maioria dos casos, temos furos de observação cujos níveis ao invés de descenderem, sobem, o que se deveu a questões operacionais associadas às condições de execução do ensaio, em que as águas rejeitadas da bombagem foram encaminhadas de tal modo que terão passado próximo destes locais, induzindo as mesmas um efeito de recarga nos furos observados. Existem, ainda, outros casos, em que os níveis dos furos de observação não sofreram qualquer variação nos níveis. Nos furos de observação, tais variações, quando existentes são, efectivamente, bastante ténues e surgem tardiamente (Figura 6.6 e Figura 6.7).

Tabela 6.1. Síntese das observações realizadas nos ensaios de bombagem da campanha de 2007 com destaque a cor azul dos melhores resultados encontrados e seleccionados para tratamento.

BOMBAGEM	OBSERVAÇÃO		
	com Influência óbvia	com ligeira influência (?)	sem influência ou sujeito a outras influências
<b>Caudal Variável</b>			
PP5B	PP5A, F2B, PP1B	F1B, F4B, F8B, PP2B	PP2B, PP6A, PP6B, PP3B
PP6B	PP6A	F8B, PP1B, F13B	PP5B, PP3B, PP2B, F12B
<b>Caudal Constante (com recuperação)</b>			
PP6A	F11B	F8B, PP2A	PP5A, PP5B, PP6B, F6B, F13B, P195, P154
PP5A	-	F2B, F4B	F1B, PP1A, PP6A, PP6B, PP5B, F3B, PP2A, PP3B

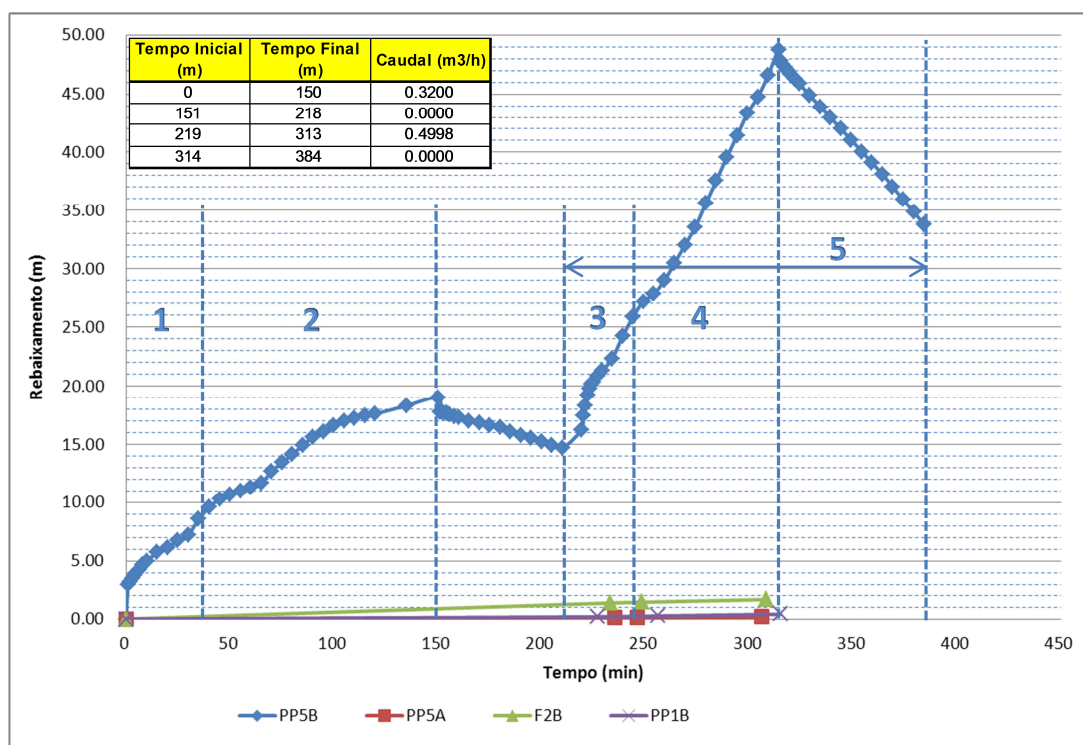


Figura 6.6. Condições gerais e faseamentos do ensaio com bombagem em PP5B e evolução dos rebaixamentos nos furos PP5B, PP5A, F2B e PP1B

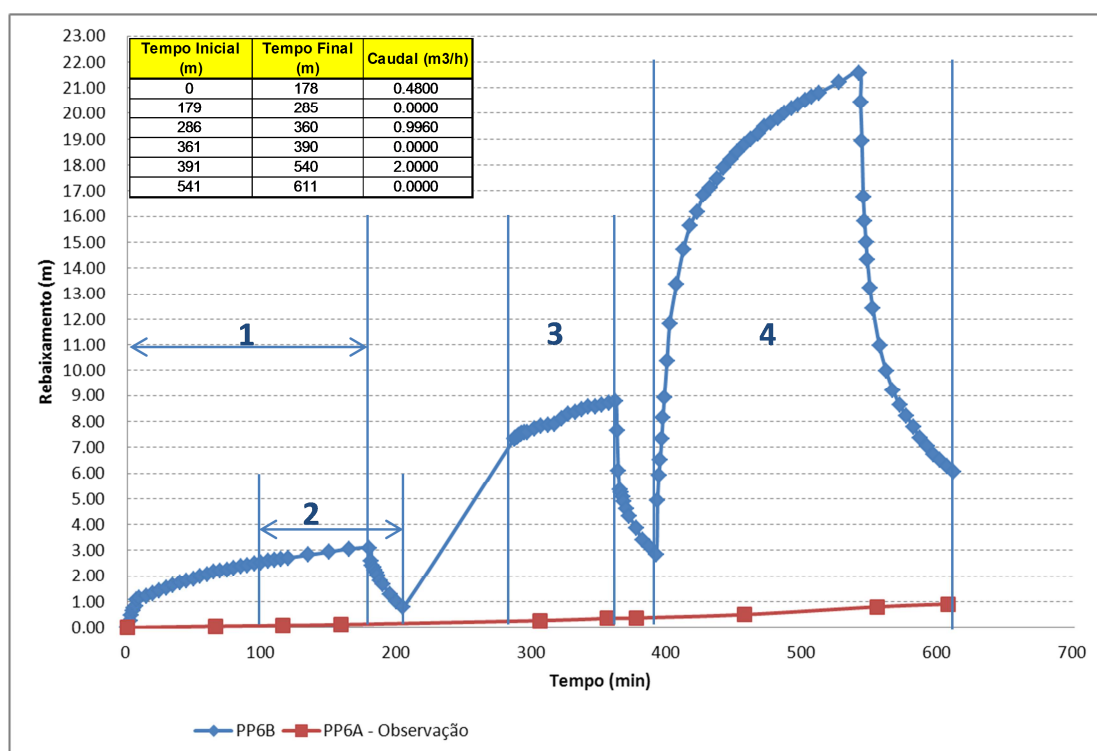


Figura 6.7. Condições gerais e faseamentos do ensaio com bombagem em PP6B e evolução dos rebaixamentos nos furos PP6B e PP6A.



Na campanha de 2008 foram executados, na área da corta, os piezómetros S2A, S2B, S4A e S4B e realizaram-se ensaios de bombagem de mais “largo espectro”, de duração mais extensa, onde, a partir de um ponto central de bombagem, igualmente situado na corta, (Poço P1) se efectuaram observações em diferentes poços e furos situados na envolvente sob o objectivo de se tentar melhor discriminar a variabilidade espacial das condições de Transmissividade segundo diferentes direcções e, portanto, segundo diferentes condições litológico-estruturais (Figura 6.8). Estes ensaios realizaram-se a caudal constante (60 litros/minuto).

Das observações disponíveis aproveitaram-se algumas as para posterior tratamento conforme se indica na Tabela 6.2. Igualmente, em alguns dos casos, temos furos de observação cujos níveis ao invés de descerem, sobem, o que se deveu, igualmente, a questões operacionais associadas às condições de execução do ensaio, devidas a águas da Estação de Tratamento de Efluentes que terão sido rejeitadas, induzindo efeitos de recarga em alguns furos. Existem, ainda, outros casos, em que os níveis dos furos de observação não sofreram qualquer variação a sua proximidade – S2A, S2B, S4A e S4B, situação que se deverá ao facto de sobrejacentemente a estes furos se encontrar uma matriz composta por minérios pobres de diversas granulometrias, sob condições saturadas que chega a atingir espessuras na ordem dos 50 a 80 metros e que, portanto, irão induzir um efeito de recarga e de pressão hidrostática tal que não permiti verificar evoluções, em curtos prazos de bombagem, entre furos próximos a e que se encontram selados na extensão em que a matriz de minérios pobres é intersectada.

No ensaio de maior duração, efectuado com bombagem em P1, existem variações francamente mais acentuadas e notórias (Figura 6.9 e Figura 6.10) entre os resultados obtidos em furos instaurados no interior da corta e os demais furos, situados em redor da mesma, e que intersectam as fácies graníticas. Neste contexto, é de salientar a maior Transmissividade do meio nos Furos localizados no interior da corta e que intersectam o maciço rochoso subjacente (S2A, S2B, S4A, S4B), respeitantes à área correspondente ao xenólito remanescente da fase de exploração, composto por metassedimentos do Complexo Xisto-Grauváquico (Figura 6.10). As maiores permeabilidades desta formação, com escoamentos mais facilitados, dados pela xistosidade de direcção principal sub-vertical e zonas de contacto e de transição entre as fácies graníticas, migmatíticas e xistentas, são, efectivamente, contrastantes, quando comparadas com as do maciço situado em redor da corta (Figura 6.9). No caso dos furos S2A, S2B, S4A, S4B, os rebaixamentos nos estádios iniciais são “quase imediatos” perpetuando-se, com comportamento constante e proporcionalmente semelhante no tempo.

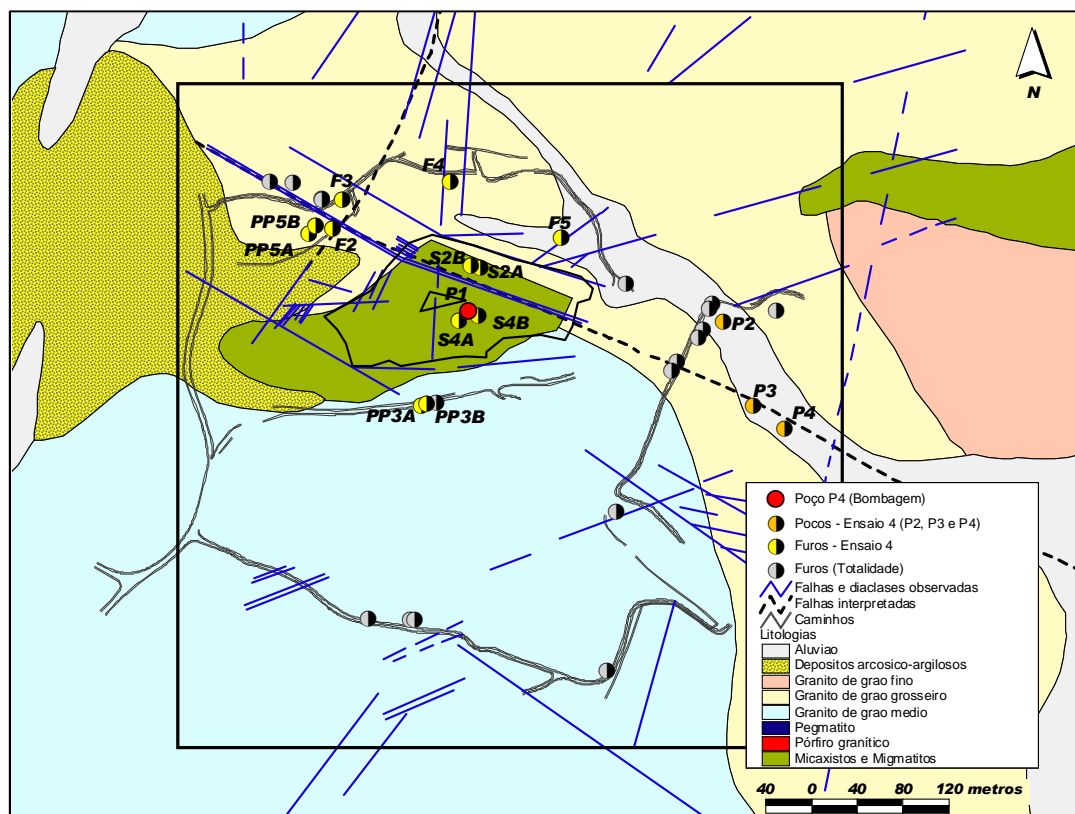


Figura 6.8. Enquadramento litológico-estrutural dos furos usados para bombagem e de observação de níveis da campanha de 2008.

Tabela 6.2. Síntese das observações realizadas nos ensaios de bombagem da campanha de 2007 com destaque a cor azul dos melhores resultados encontrados e seleccionados para tratamento.

BOMBAGEM	OBSERVAÇÃO		
	c/ Influência óbvia	c/ ligeira influência (?)	s/ influência ou sujeito a outras influências
Caudal Constante, com recuperação			
<b>Ensaio 4 - P1: antigo poço de lixiviação instalado no centro da corta</b>	S4A, S4B, S2A, S2B, P2, P3, P4, F2, F3, F4, F5, PP3A, PP3B, PP5A, PP5B	<b>PP2A (?)</b>	F6B, PP6B, PP6A, PP2B (os níveis dos furos sobem, devido a efeitos resultantes da descarga das bacias de decantação)
<b>Ensaio 1 - S4B</b>	S4A, S2A, S2B (os níveis dos furos não se alteraram; cargas sobrejacentes altas devido a resíduos saturados?)		
<b>Ensaio 2 - S2B</b>	S4B, S2A, S2B (os níveis dos furos não se alteraram; cargas sobrejacentes altas devido a resíduos saturados?)		
<b>Ensaio 3 - S2B</b>	S4A, S2A, S4B, PP6A, PP6B (os níveis dos furos não se alteraram; cargas sobrejacentes altas devido a resíduos saturados?)		

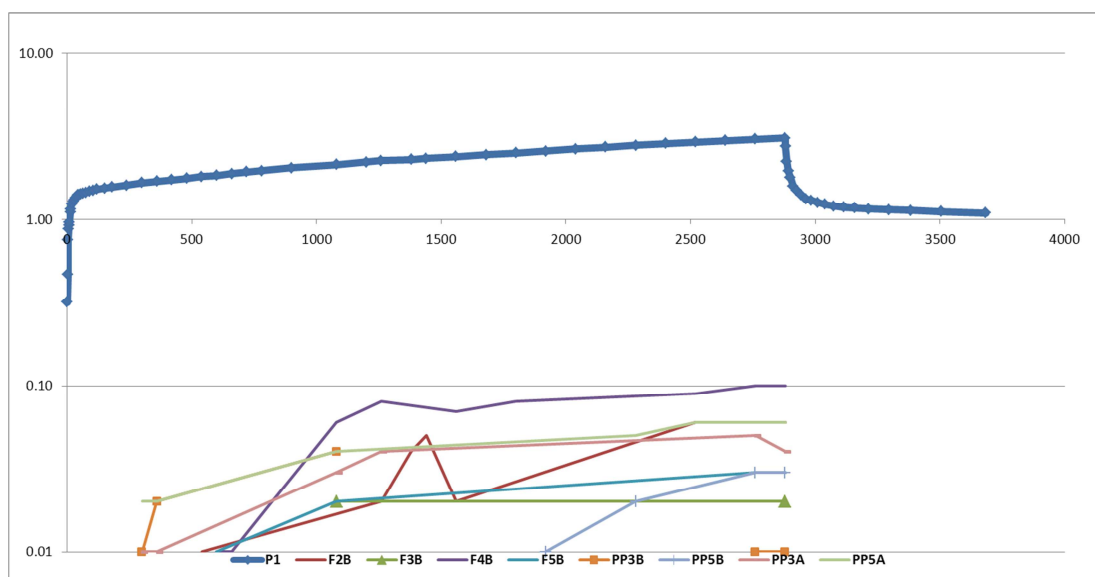


Figura 6.9. Rebaixamentos em Furos e Piezômetros na envoltória à corta - F2B, F3B, F4B, F5B, PP5B, PP5A, PP3B e PP3A.

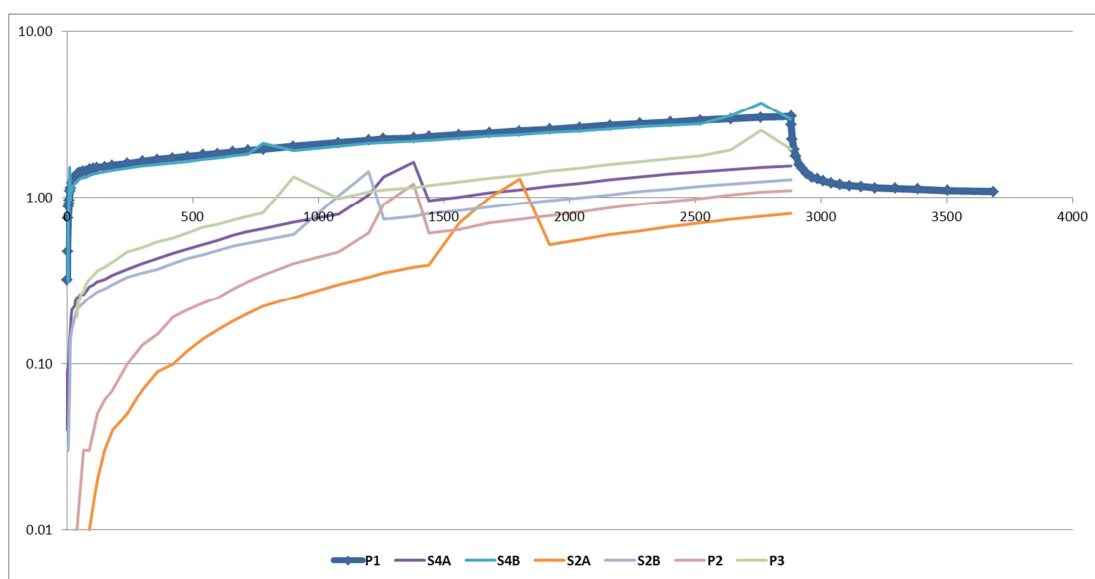


Figura 6.10. Rebaixamentos no Poço P1 e em Furos localizados no interior da corta e que intersectam o maciço rochoso subjacente (S2A, S2B, S4A, S4B).

### 6.1.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS SELECIONADOS

#### 6.1.3.1 Características do maciço nas áreas de PP5B E PP6B e influências no respectivo comportamento hidráulico

O enquadramento litológico dos furos PP5B e PP6B é distinto, apresentando estas diferenças notórias em diversas características do maciço que foram inventariadas.

O Furo PP5B localiza-se no Bloco Noroeste da área de estudo, onde ocorre um granito de grão grosseiro, porfiróide, por vezes com intercalações pegmatíticas. Este furo intersecta uma zona de

alteração importante em profundidade, fortemente argilizada e sericitizada devido à presença da estrutura principal. Os testemunhos de sondagem mostram elevados estádios de alteração do maciço até profundidades na ordem dos 40 metros, com reincidências em profundidade, nomeadamente aos 55 metros (Figura 6.11).

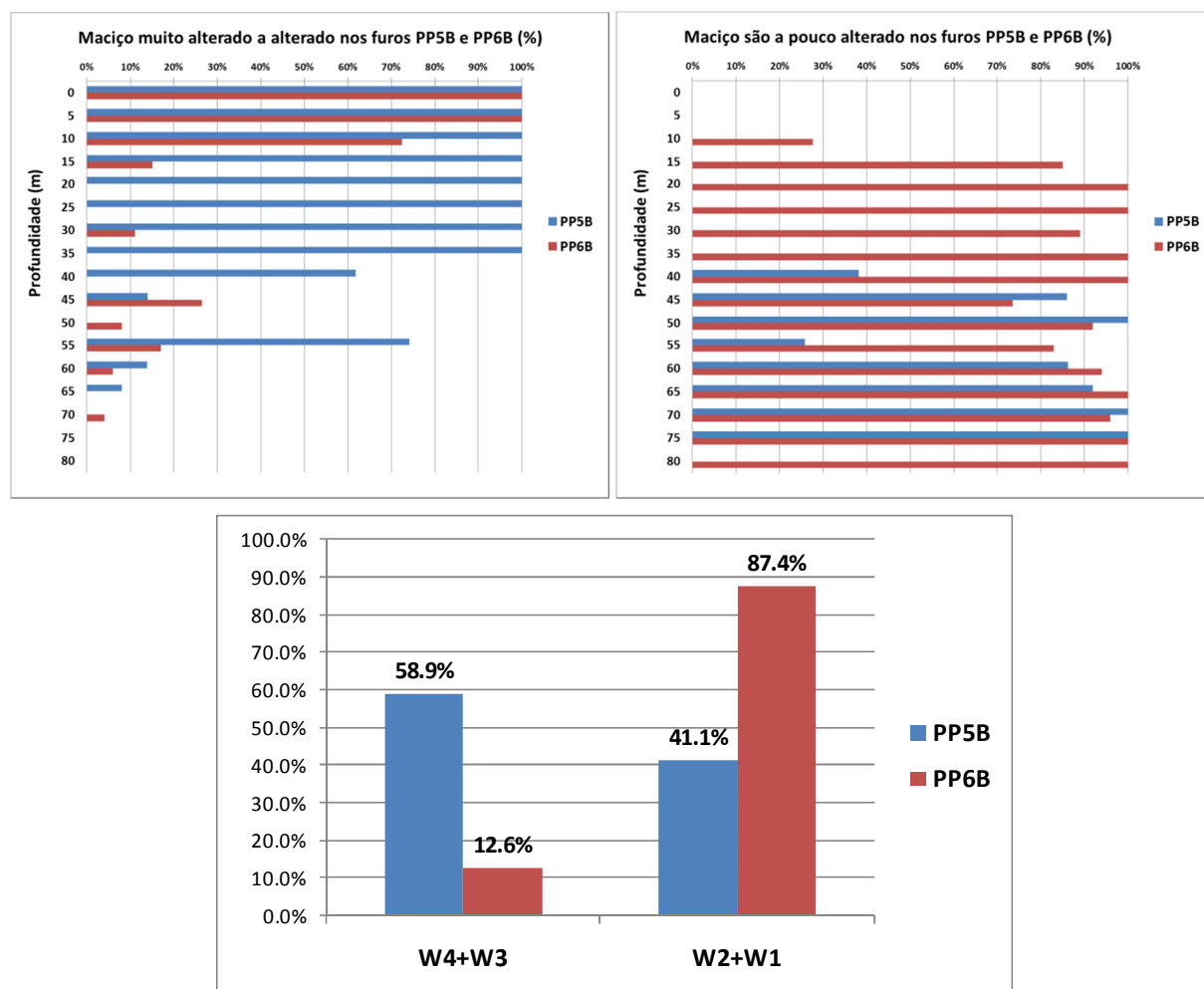


Figura 6.11 Níveis de alteração do maciço rochoso dos furos PP5B e PP6B.

Os efeitos da alteração sericítica e argilítica intensa na área deste furo, tornam importante a fracção de matriz de natureza siltosa a silto-argilosa, facto com repercussões óbvias no funcionamento hidráulico da formação, a nível local, indiciado pelos resultados dos ensaios de bombagem, que são indicativos dum funcionamento predominantemente por porosidade. Com efeito, não são acentuadas as diferenças nos resultados dos ensaios de bombagem, quando estes são interpretados pelo “Método de Theis com Correção de Jacob” ou pelo “Método de Porosidade Dupla”, ou ainda, nos períodos de recuperação com o auxílio do “Método de Argawal”. Verifica-se, igualmente, uma certa constância nos valores de Transmissividade para os diversos estádios do ensaio de bombagem realizado, que parecem indicar um funcionamento hidráulico do maciço mais regular, situação pouco usual em maciços com

funcionamento hidráulico por fracturação ou com situações que, neste contexto, se poderiam considerar como sendo de comportamento misto.

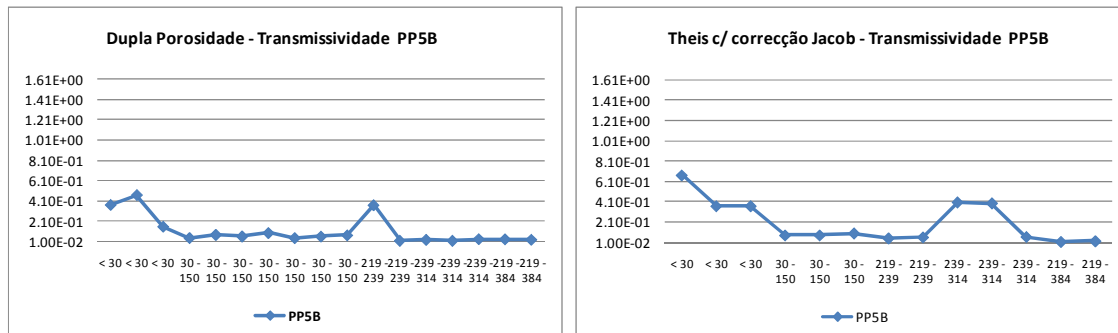


Figura 6.12. Valores de Transmissividade ( $m^2/dia$ ) do furo PP5B obtidos nas diversas fases do ensaio de bombagem e por interpretação com recurso a diferentes métodos de análise.

Pelo contrário, o furo PP6B, situado a sudeste e instalado numa área litologicamente distinta, composta por um granito de grão grosseiro a médio maioritariamente biotítico, aparenta um comportamento hidráulico distinto, condicionado pelo maciço rochoso, este predominantemente são a pouco alterado (Figura 6.11). Tal comportamento será, portanto, muito mais dependente das características da fracturação do que o do caso do furo PP5B.

O furo PP6B apresenta valores de Transmissividade superiores aos do furo PP5B (Figura 6.13), o que parece querer evidenciar esta distinção no tipo de comportamento hidráulico. Com efeito, apresentando o furo PP6B um comportamento essencialmente dado por fracturação e o furo PP5B um comportamento, pelo menos nas primeiras fases de ensaio, essencialmente por porosidade, em que esta é resultante da existência de uma matriz de natureza pouco permeável, é natural que os valores de Transmissividade de PP6B sejam tendencialmente superiores, ainda mais ao verificar-se que a fracturação intersectada neste furo apresenta baixos graus de preenchimento (Figura 6.14).

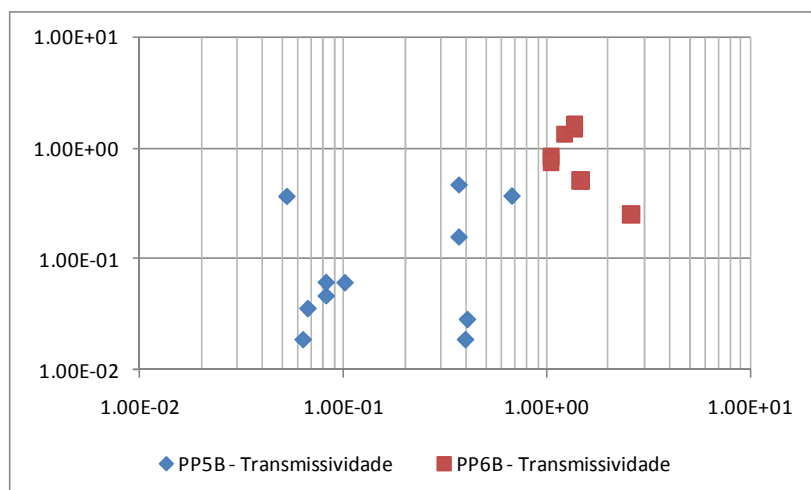


Figura 6.13. Valores de transmissividade ( $\text{m}^2/\text{dia}$ ) dos furos PP5B e PP6B obtidos nas diversas fases dos ensaios de bombagem e por interpretação com recurso a diferentes métodos de análise (abcissas – resultados obtidos pelo “Método de Theis com Correção de Jacob”; ordenadas – valores obtidos pelo “Método de Porosidade Dupla”).

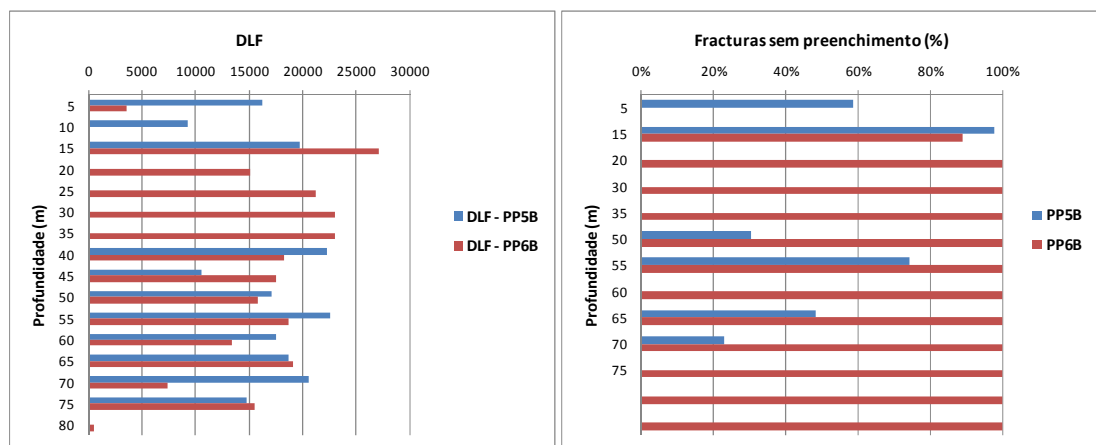


Figura 6.14. Densidade linear da fracturação (DLF) nos furos PP5B e PP6B e evolução em profundidade dos graus de preenchimento das fracturas.

Ainda nesta linha de raciocínio, no caso do furo PP6B, as diferenças entre resultados de ensaios interpretados pelo “Método de Theis com Correção de Jacob” ou pelo “Método de Porosidade Dupla” são mais acentuadas (Figura 6.15). É igualmente curiosa a existência de valores de Transmissividade mais elevados para as primeiras fases do ensaio de bombagem do furo PP6B (até aos 100 minutos) os quais, com o avanço do ensaio, diminuem em cerca de uma ordem de magnitude quando se consideram os resultados da interpretação pelo “Método de Porosidade Dupla”, que, para a situação concreta deste furo, será presumivelmente a mais adequada (Figura 6.15). Da aplicação do “Método de Theis com Correção de Jacob” apenas se obtêm valores que são equiparáveis com os das primeiras fases do ensaio de bombagem quando este é interpretado pelo “Método de Porosidade Dupla”, o que será uma consequência directa dos próprios pressupostos teóricos e dos princípios associados ao modo de ajustamento das curvas aos resultados observados.

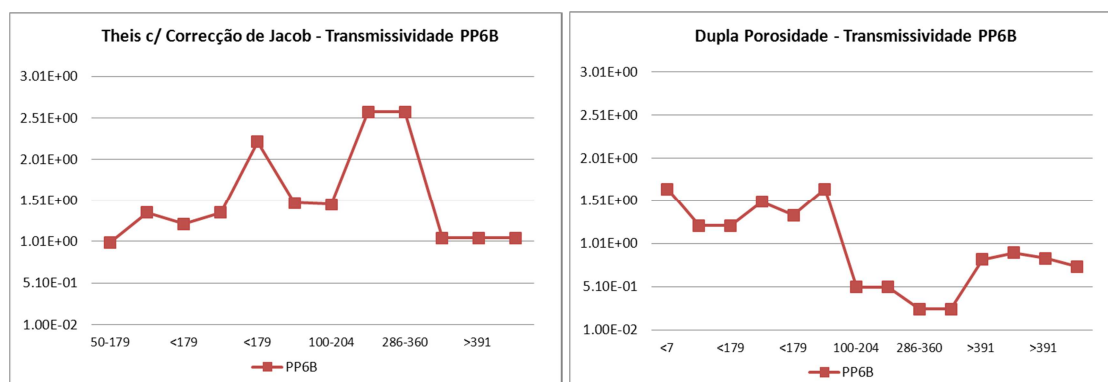


Figura 6.15. Valores de transmissividade ( $\text{m}^2/\text{dia}$ ) do furo PP6B obtidos nas diversas fases do ensaio de bombagem e por interpretação com recurso a diferentes métodos de análise.

Os resultados da interpretação pelo método da “Dupla Porosidade” do Furo PP6B, com valores mais elevados na primeira fase do ensaio, e com a presença de heterogeneidades, constituem situação típica do funcionamento hidráulico de maciços rochosos em que, pelo menos numa primeira fase, o sistema de fracturação será o meio preponderante de alimentação do furo.

Neste tipo de maciços, ao longo das diferentes fases do processo de bombagem podem surgir águas de origens e sob influências distintas, sejam as que provêm, numa primeira fase, da fracturação, seja pela porosidade da matriz rochosa em si, seja devido à intersecção de filões com quartzo ou áreas brecheficadas que são intersectadas pelos furos analisados ou, ainda, por efeitos de matriz devidos a fenómenos de alteração, como parece suceder no caso do furo PP5B, em virtude da intersecção com estruturas sericitizadas e argilizadas.

A maior predominância de efeitos de limonitização em maior profundidade no furo PP5B em comparação com o furo PP6B (Figura 6.16) será indicadora de que os escoamentos em profundidade se encontram mais facilitados no caso da predominância de um maciço “mais alterado” do que “mais fracturado”, ainda que as velocidades de escoamento espectáveis nestas situações sejam claramente distintas e substancialmente inferiores no caso de um maciço “muito alterado” mas em que a predominância da matriz seja de natureza siltosa a silto-argilosa, situação esta que se verifica em PP5B, e que poderá induzir no meio, inclusivamente, um “efeito barreira” ou atenuador à perpetuação dos escoamentos.

As velocidades de escoamento em sistemas que funcionam por fracturação serão indubitavelmente superiores, mas a sua perpetuação em termos espaciais encontrar-se-á sempre muito condicionada às propriedades intrínsecas da fracturação, como o caso da existência ou não de enchimentos nas fracturas, do seu grau de interconexão e da redução do seu grau de abertura (fecho) com a profundidade.

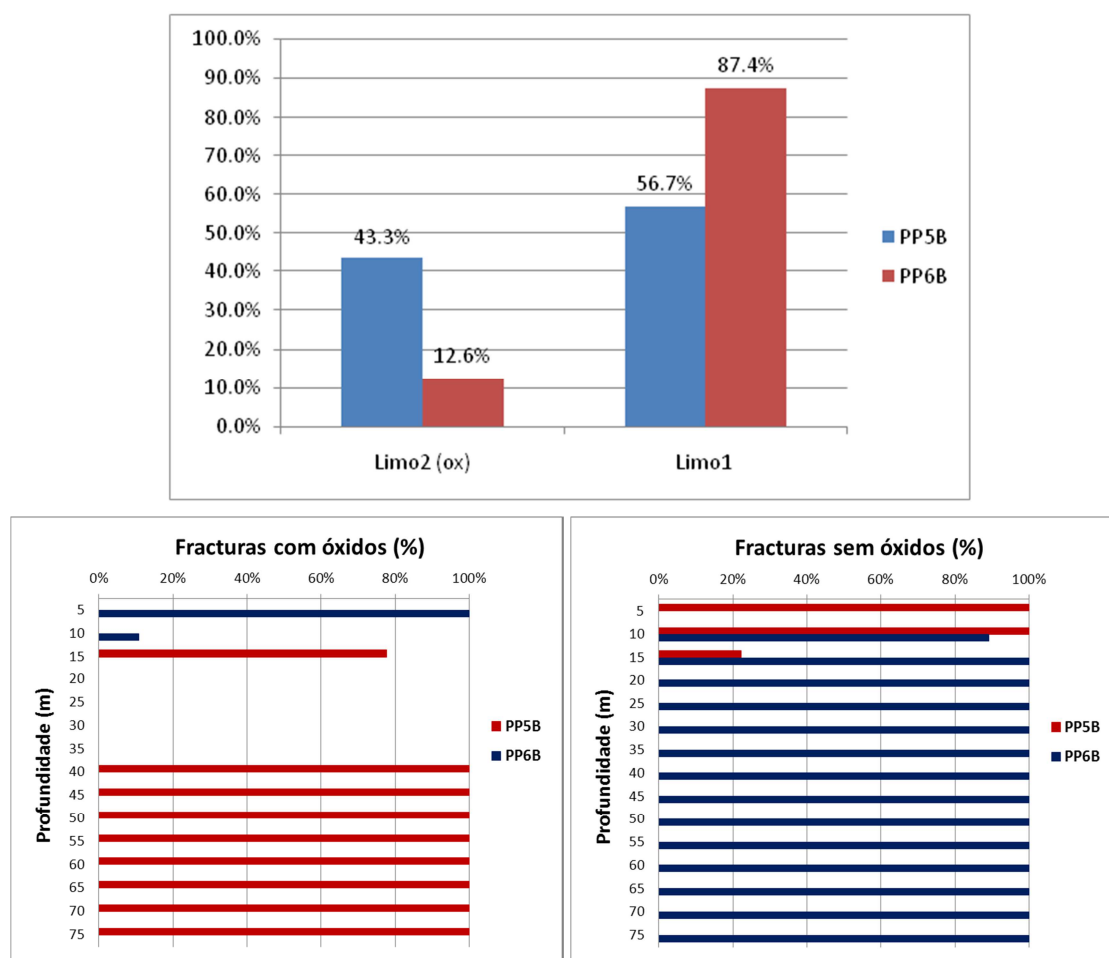


Figura 6.16. Efeitos de oxidação em profundidade nos maciços e nas superfícies das fracturas intersectadas pelos furos PP5B e PP6B

A existência de fenómenos de oxidação até maiores profundidades no caso do furo PP5B (Figura 6.16) significa que, para além de haver água em circulação, também existirá oxigénio, tendo este de circular até maiores profundidades sem se esgotar previamente em reacções químicas no seu percurso. Este facto evidência a existência de alguma dinâmica no sistema.

Por sua vez, os baixos coeficientes de armazenamento em PP5B comparativamente com os de PP6B (Figura 6.17) consubstanciam as diferenças constatadas, em termos de funcionamento hidráulico, uma vez que evidenciam uma maior disponibilidade de água gravítica ou seja, água que, por gravidade, poderá ser retirada do sistema aquífero, situação que se encontrará mais facilitada nas áreas do maciço que funcionam essencialmente por fracturação do que nas áreas que se apresentam com maior grau de alteração sericítica e/ou argilítica. Efectivamente, os coeficientes mais baixos que se verificam para o caso do furo PP5B reflectem um comportamento que não é o mais usual em maciços cristalinos, mas que neste caso concreto se poderá justificar pela tipologia de alteração na zona meteorizada de PP5B e pelo grau de aberturas e interconexão das fracturas na zona fracturada de PP6B.



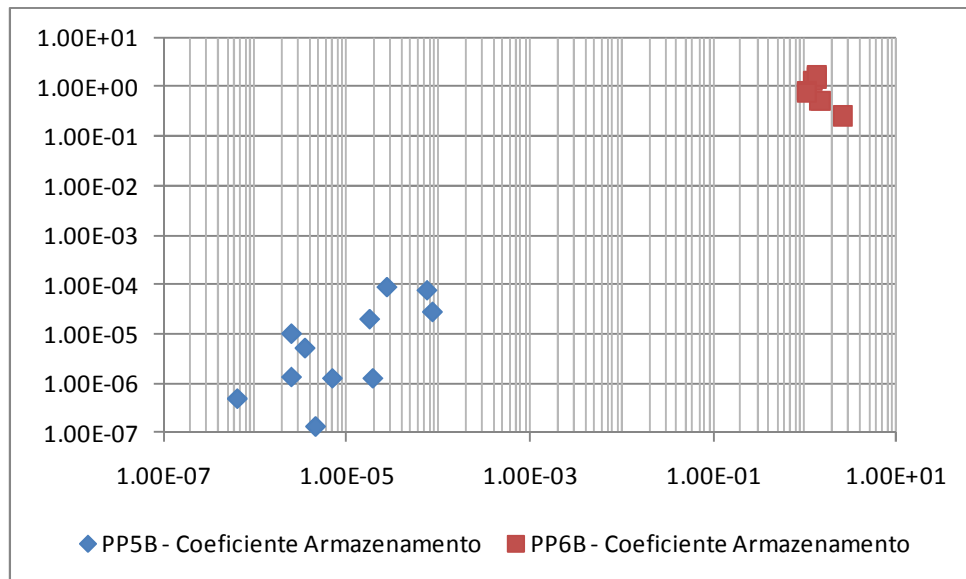


Figura 6.17. Valores do Coeficiente de Armazenamento dos furos PP5B e PP6B, obtidos nas diversas fases do ensaio de bombagem e por interpretação com recurso a diferentes métodos de análise (abcissas – resultados obtidos pelo “Método de Theis com Correção de Jacob”; ordenadas – valores obtidos pelo “Método de Porosidade Dupla”).

Temos, assim, dois tipos de unidades hidráulicas a considerar:

- Uma, sediada na área dos granitos de grão grosseiro, porfiróides, por vezes com intercalações pegmatíticas, onde os efeitos de argilização e sericitização do maciço induzem um funcionamento predominante por porosidade, com um meio tridimensionalmente mais homogêneo, mas com baixos valores de Transmissividade, velocidades de escoamento mais lentas e menor facilidade na cedência de água em virtude da existência de uma matriz siltosa a silto-argilosa;
- Uma outra, sediada na área dos granitos cinzentos, de grão grosseiro a médio, maioritariamente biotíticos, que funcionará essencialmente por fracturação, com velocidades de escoamento, pelo menos nas primeiras fases de ensaio, mais rápidas e maior facilidade na cedência de água mas tridimensionalmente heterogênea e com perpetuação de escoamentos a maiores distâncias muito condicionada às características da fracturação e à intersecção com outras estruturas que possam ser fonte de alimentação, tais como zonas de brecha ou filões com quartzo.

### 6.1.3.2 Características do maciço na área noroeste e influências no respectivo comportamento hidráulico (furos PP5B, PP1B, F2B E PP5A)

Os resultados indicam que nesta área, composta por granitos de grão grosseiro, porfiróides, por vezes com intercalações pegmatíticas, os efeitos de argilização e sericitização do maciço induzem um funcionamento predominante por porosidade, com um meio tridimensionalmente mais homogêneo, baixos valores de transmissividade, velocidades de escoamento mais lentas e menor facilidade na cedência de água em virtude da existência de uma matriz siltosa a silto-argilosa.

Nesta área, e de um modo geral, o maciço rochoso apresenta-se fortemente alterado até profundidades na ordem dos 30 a 35 metros (Figura 6.11).

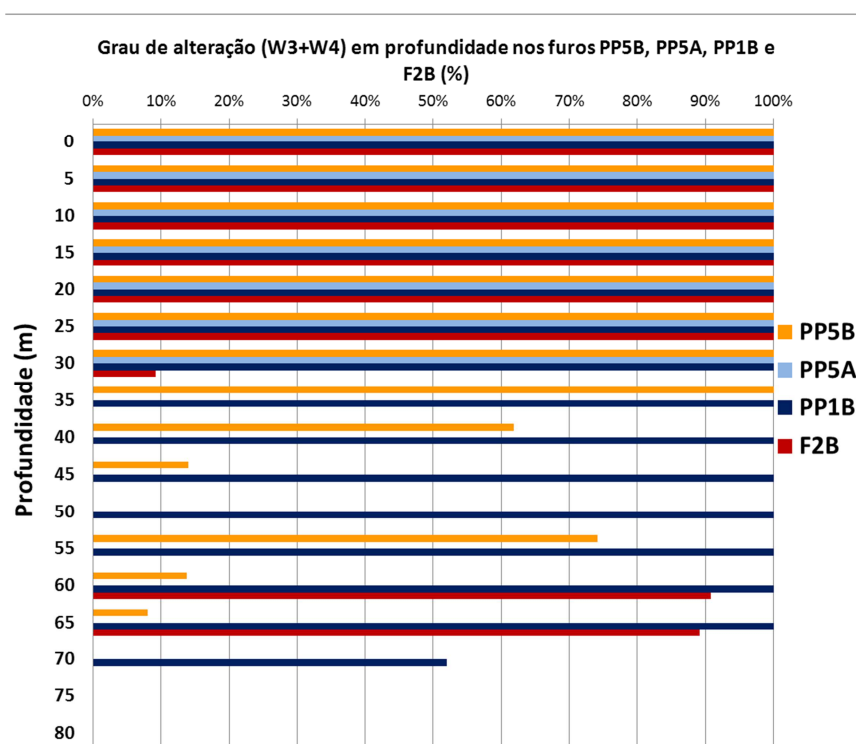


Figura 6.18. Níveis de maior alteração do maciço rochoso na área dos furos PP5B, PP1B, PP5A E F2B.

Da análise conjugada, entre diferentes furos, dos resultados dos ensaios de bombagem, são perfeitamente distinguíveis dois tipos de comportamento distintos.

Por um lado, temos o caso dos furos “PP5B” e “F2B”, onde, em profundidades superiores a cerca de 30 metros, a matriz rochosa menos alterada começa a predominar e, portanto, o comportamento hidráulico das formações será mais condicionado pelas características da fracturação. Por outro temos a situação respeitante ao furo PP1B, que se apresenta sempre bastante alterado em profundidade. Note-se que os furos PP5B e PP1B se encontram selados em toda a parte superior do maciço alterado (para o furo PP1B o parâmetro “L” encontra-se compreendido entre os 48 e os 78 metros e para o furo PP5B

o valor de “L” verifica-se entre os 30 e os 78,6 metros). Neste caso obtiveram-se, pelo método de “Dupla Porosidade”, valores de transmissividade baixos ( $4,53 \times 10^2 \text{ m}^2/\text{dia}$ ) para o furo PP1B, equiparáveis aos verificados para o furo “PP5B” pelo mesmo método de análise. Este comportamento poderá explicar-se pelas altas percentagens de preenchimento que a as fracturas localmente apresentam (Figura 6.19).

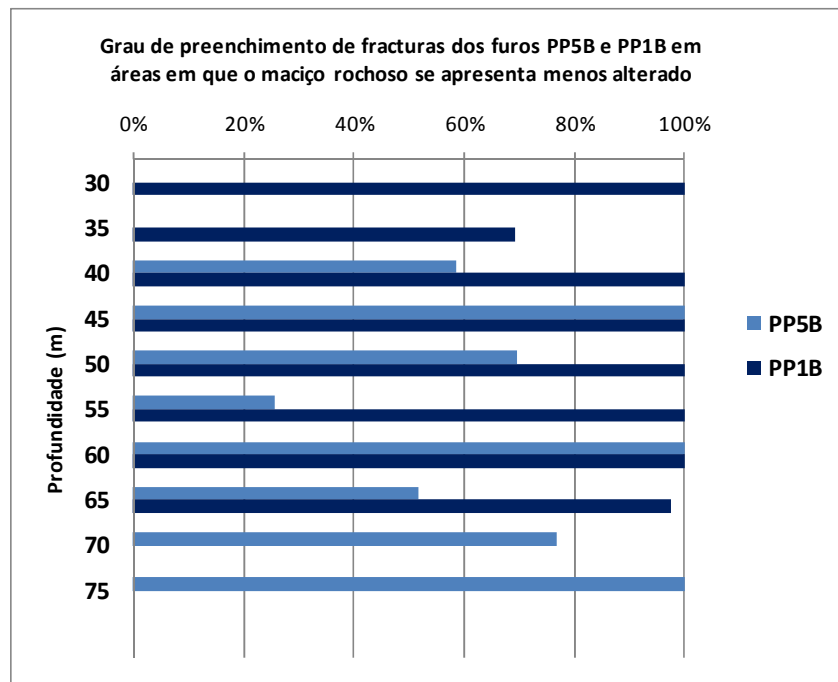


Figura 6.19. Grau de preenchimento das fracturas dos furos PP1B e PP5B no maciço rochoso menos alterado e em profundidade (valores em percentagem).

Mais uma vez, é de registar, o dinamismo inerente a esta área, onde se verifica a existência relevante de óxidos em profundidade em ambos os casos (PP5B e PP1B), o que indica a existência de fenómenos de percolação de água e de oxidação (Figura 6.20).

No entanto, e não obstante esta evidência de circulação de águas em profundidade, as velocidades de escoamento nesta área serão muito baixas, uma vez que as reacções no furo PP1B aquando da bombagem em PP5B foram muito pouco acentuadas e só se fizeram sentir na fase mais avançada da bombagem, além dos 239 minutos de ensaio, isto não obstante a grande proximidade entre ambos os furos, distanciados entre si cerca de 26 metros.

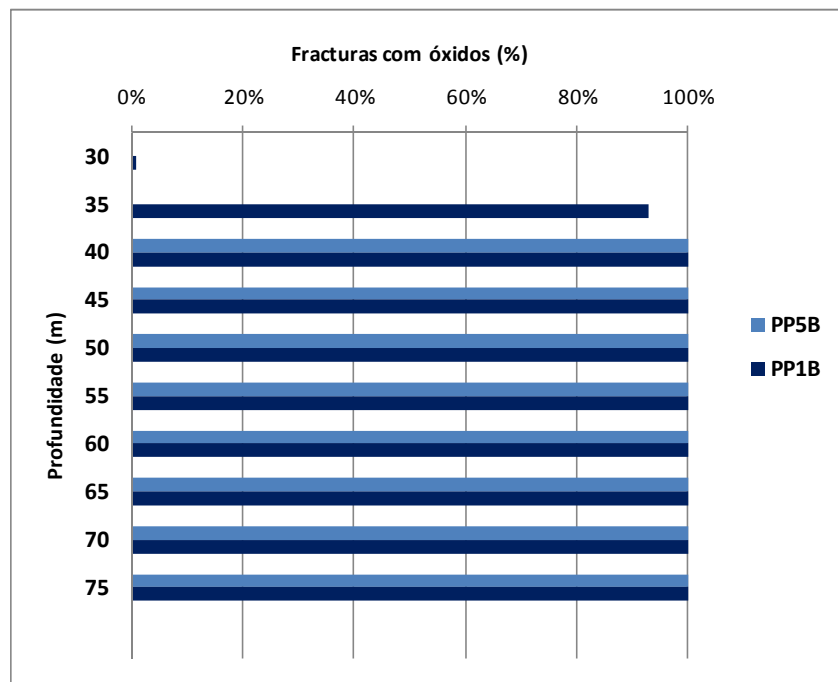


Figura 6.20. Presença de óxidos nas superfícies das fracturas dos furos PP1B e PP5B (valores em percentagem).

Mais uma vez, esta maior predominância de efeitos de oxidação a maiores profundidades será indicadora de que os escoamentos em profundidade se encontram mais facilitados nesta área do maciço

O maciço entre os furos “**PP5B-PP5A**” e “**PP5B-F2B**” apresentam valores substancialmente mais altos de transmissividade, em mais de uma ordem de magnitude (Figura 6.21).

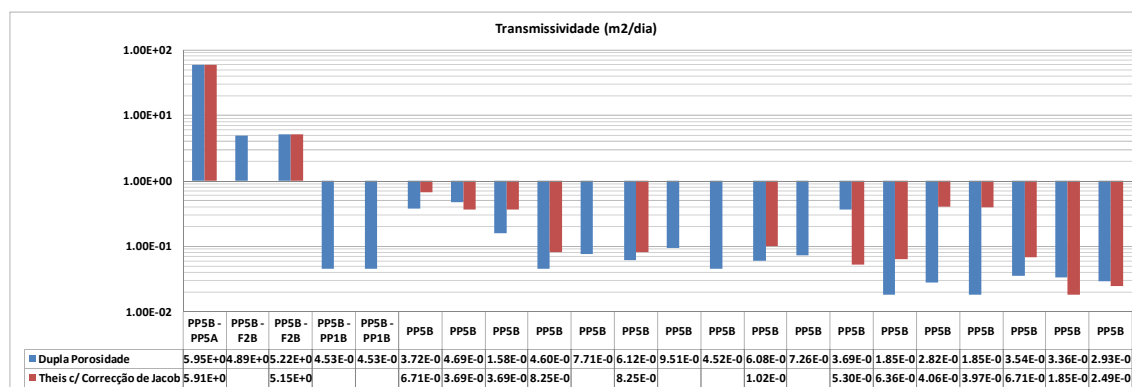


Figura 6.21. Resultados de transmissividade (em m<sup>2</sup>/dia) do ensaio de bombagem realizado em PP5B.

Neste caso, e considerando todos os resultados existentes, nomeadamente os de furação (Figura 6.22), os valores de transmissividade altos podem ser explicados pela existência de falhas com direcção Norte-Sul ou de atitudes encastráveis no primeiro quadrante, que se sabe serem geralmente

produtivas nesta área. Algumas destas falhas foram inclusivamente identificadas, durante a furação, como locais de surgência de água. Igualmente, a possibilidade da superfície de contacto entre o granito muito alterado e o granito são funcionar como uma zona em que a transmissão dos escoamentos se encontra facilitada poderá explicar estes maiores valores de transmissividade.

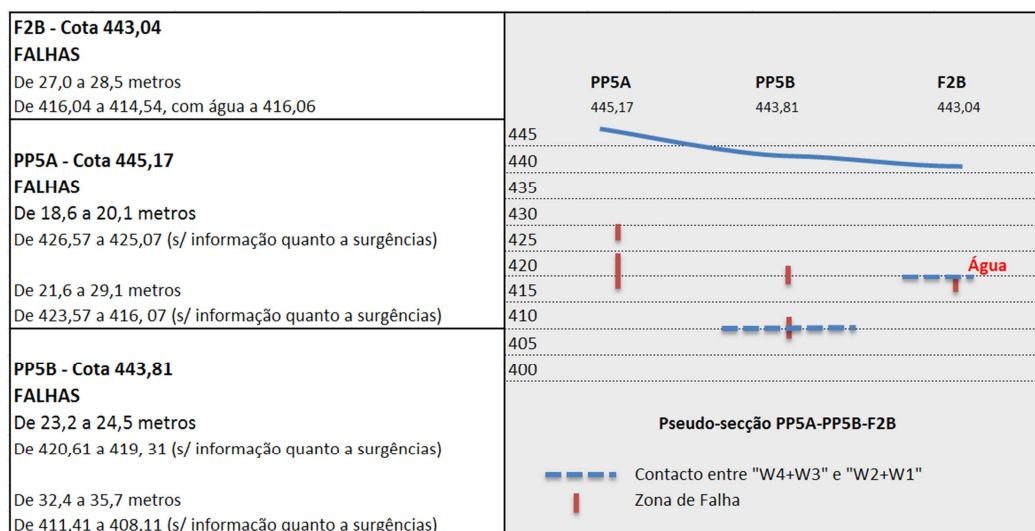


Figura 6.22. Zonas de contacto entre o granito mais alterado e mais são e zonas de falha, identificadas em profundidade durante os trabalhos de furação nos furos PP5A, PP5B e F2B, e que poderão explicar as maiores transmissividades verificadas entre PP5B e PP5A e F2B.

Um aspecto interessante a realçar é a aparente lei linear (Figura 6.23) que os resultados de transmissividade parecem respeitar quando se comparam os valores de transmissividade obtidos para o maciço entre os furos “PP5B–PP5A” e “PP5B–F2B” conjuntamente com os da primeira fase de bombagem no furo PP5B (“PP5B – 1.<sup>a</sup> Fase). Já as situações respeitantes ao maciço entre os furos “PP5B–PP1B” e a das fases mais avançadas na bombagem no furo “PP5B” aparentam diferenças das do maciço entres os furos “PP5B–PP5A” e “PP5B–F2B”.

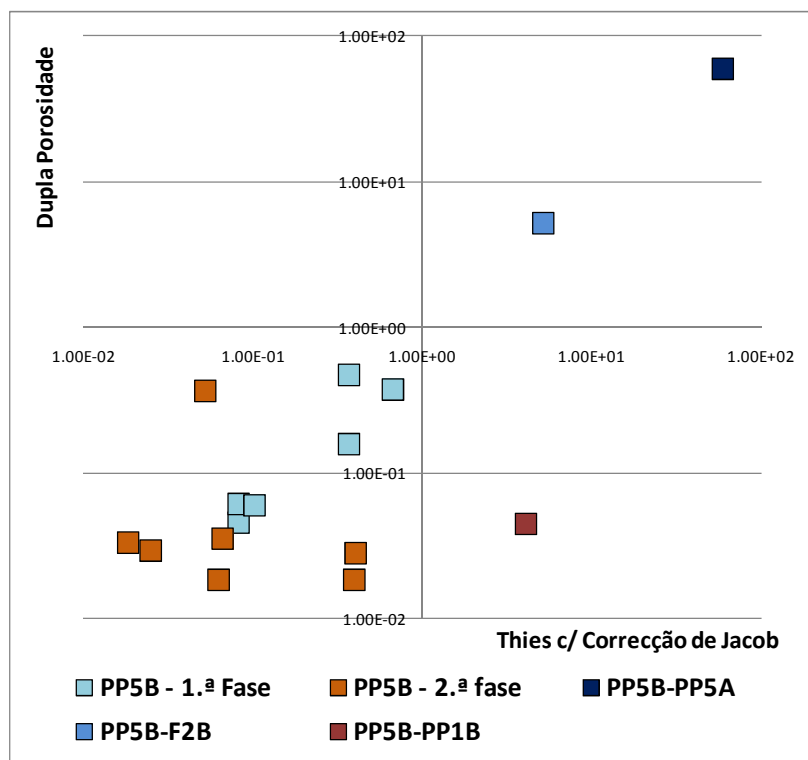


Figura 6.23. Projecção dos valores de transmissividade ( $\text{m}^2/\text{dia}$ ) obtidos segundo o método “Theis com Correção de Jacob” e de “Dupla porosidade” para o maciço na zona do furo PP5B e para o maciço que se situa entre os furos PP5B-PP1B, PP5B-PP5A e PP5B-F2B.

### 6.1.3.3 Características do maciço na área este e influências no respectivo comportamento hidráulico (análise dos furos PP6B E PP6A)

Os maiores valores de transmissividade que se verificam para o caso dos maciço situado entre os furos **“PP6B e PP6A”** (Figura 6.24) são consentâneos com a existência de um comportamento hidráulico condicionado essencialmente pela fracturação, com velocidades de escoamento, pelo menos nas primeiras fases de ensaio, superiores, e maior facilidade na cedência de água. Igualmente, no caso do furo PP6A, a heterogeneidade litológica devida a transições entre os dois tipos de granitos identificados no local poderá contribuir para os incrementos verificados nos valores de transmissividade entre os furos PP6B e PP6A.

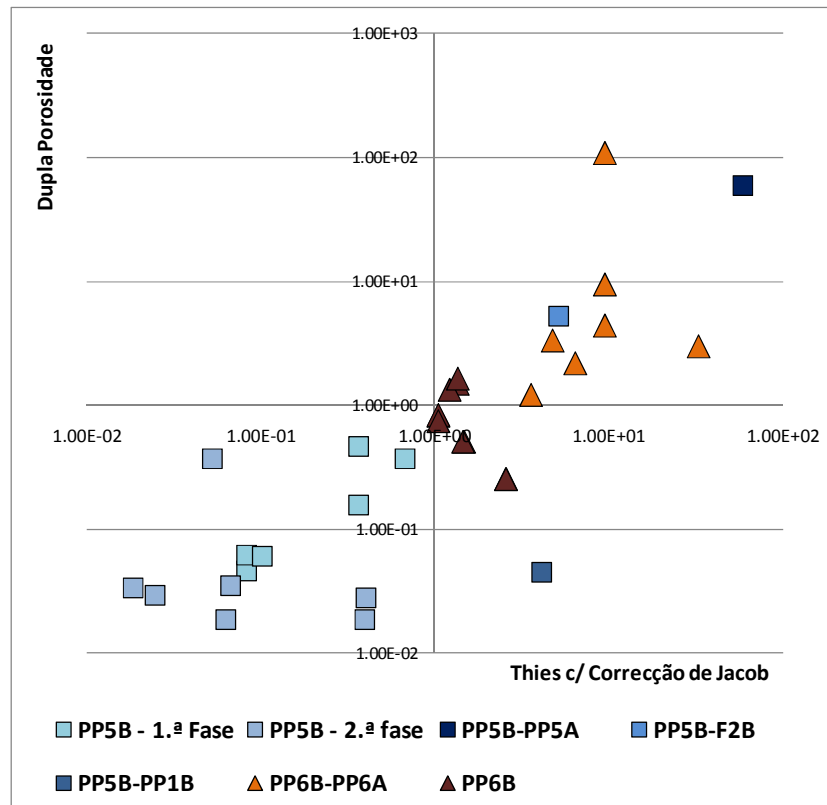


Figura 6.24. Projecção dos valores de transmissividade ( $\text{m}^2/\text{dia}$ ) obtidos segundo o método “Theis com Correção de Jacob” e de “Dupla porosidade” para o maciço na zona dos furos PP5B e PP6B e do maciço que se situa entre os furos PP5B-PP1B, PP5B-PP5A, PP5B-F2B e PP6B-PP6A.

O comportamento hidráulico e o modo de perpetuação dos escoamentos nesta área será claramente distinto do da área Noroeste, pelas diferenças litológicas, de alteração e das características de fracturação encontradas, sendo que neste sector o maciço se encontra menos alterado (Figura 6.25), apresentando-se as fracturas tendencialmente pouco preenchidas (apenas nos primeiros 6 metros no caso de PP6B e nos primeiros 8 metros em PP6A).

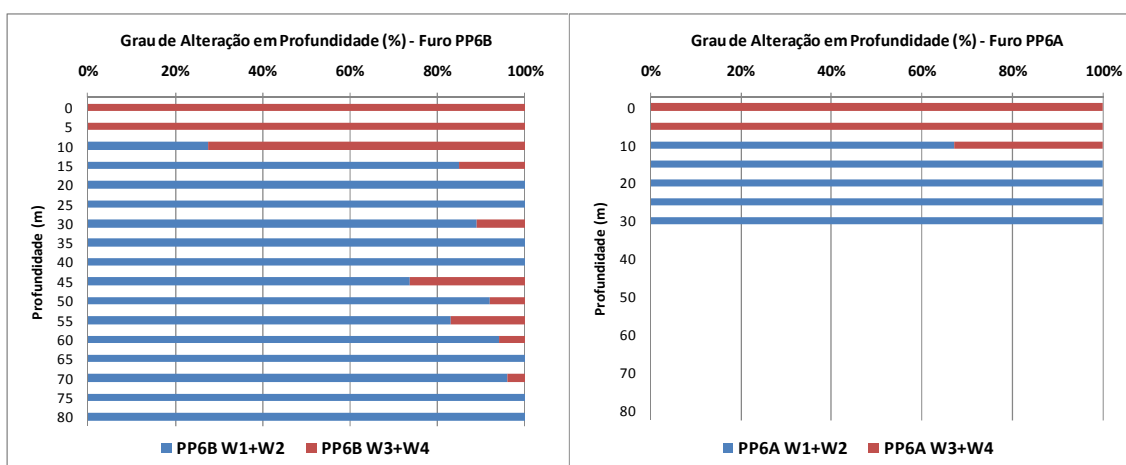
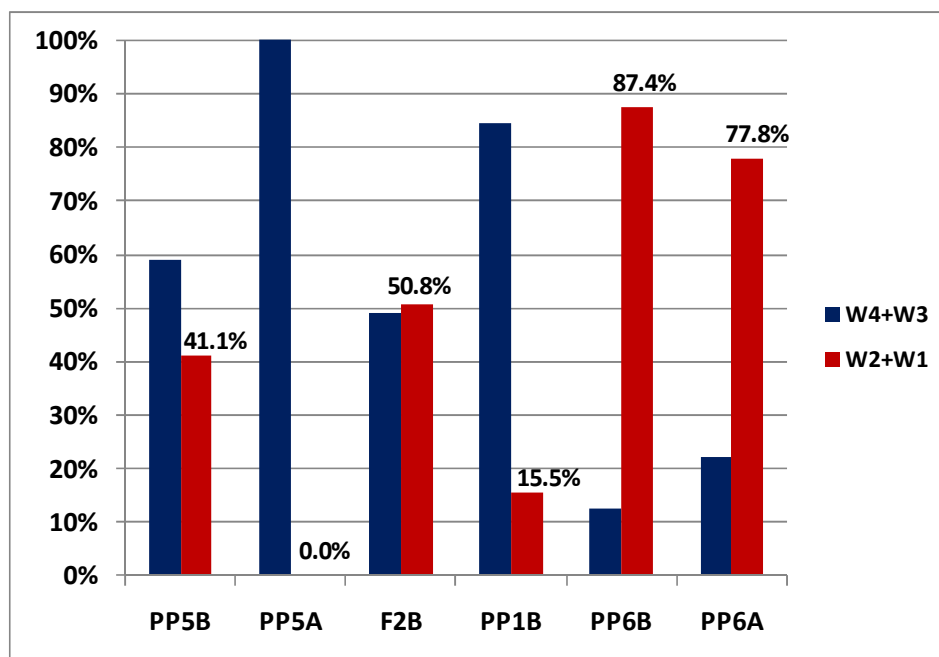


Figura 6.25. Comparação do grau de alteração entre os furos PP5B, PP1B, PP5A, F2B, PP6B e PP6A. Evolução do grau de alteração em

#### 6.1.3.4 Resultados do ensaio no Poço P1 (Ensaio 4)

Contrariamente aos ensaios realizados nos furos PP5B e PP6B, este ensaio deve ser encarado como um ensaio de maior escala (Figura 6.26), em que, nos casos de resposta positiva, são reflectidos comportamentos gerais explicados essencialmente pelas características gerais da região, onde a existência local de estruturas que funcionam como canais preferenciais ao escoamento serão seguramente a primeira razão dos rebaixamentos detectados, pelos menos nas primeiras fases de ensaio.



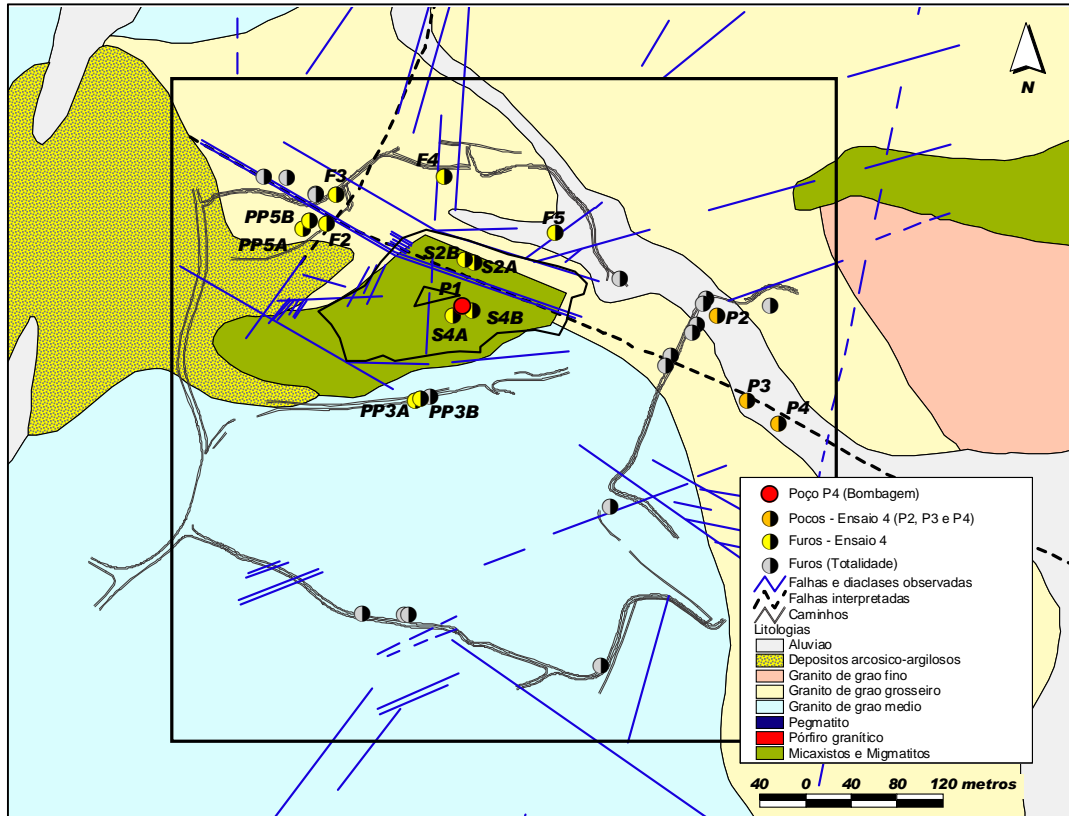


Figura 6.26. Ensaio 4 – Localização do Poço de bombagem “P1” e dos Poços e Furos com resultados passíveis de interpretação.

Com efeito, a totalidade dos resultados obtidos para os ensaios de bombagem indicam valores de transmissividades que, a maiores distâncias, e a 3D, são superiores às que são obtidas localmente (Figura 6.27 e Figura 6.28).

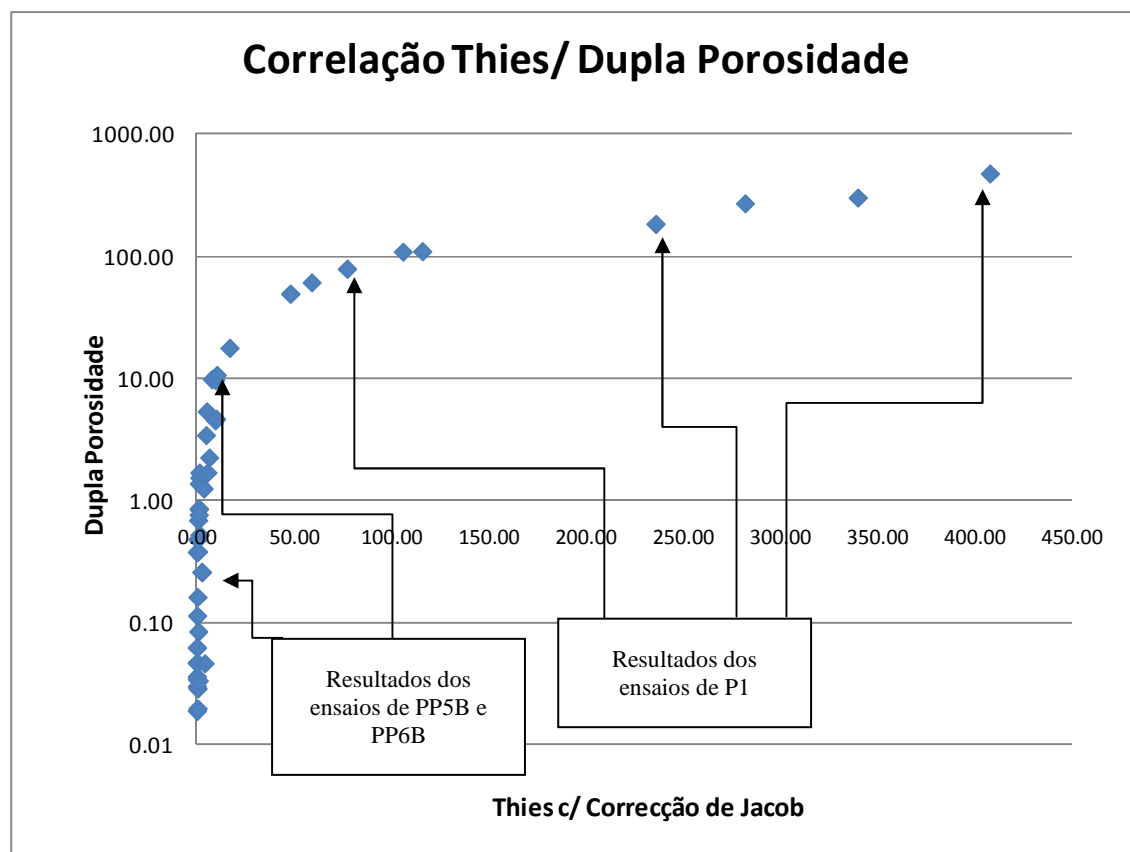


Figura 6.27. Correlação dos valores de transmissividade ( $\text{m}^2/\text{dia}$ ) obtidos pelos Métodos de “Theis com Correção de Jacob” e de “Dupla Porosidade” para a totalidade dos ensaios.

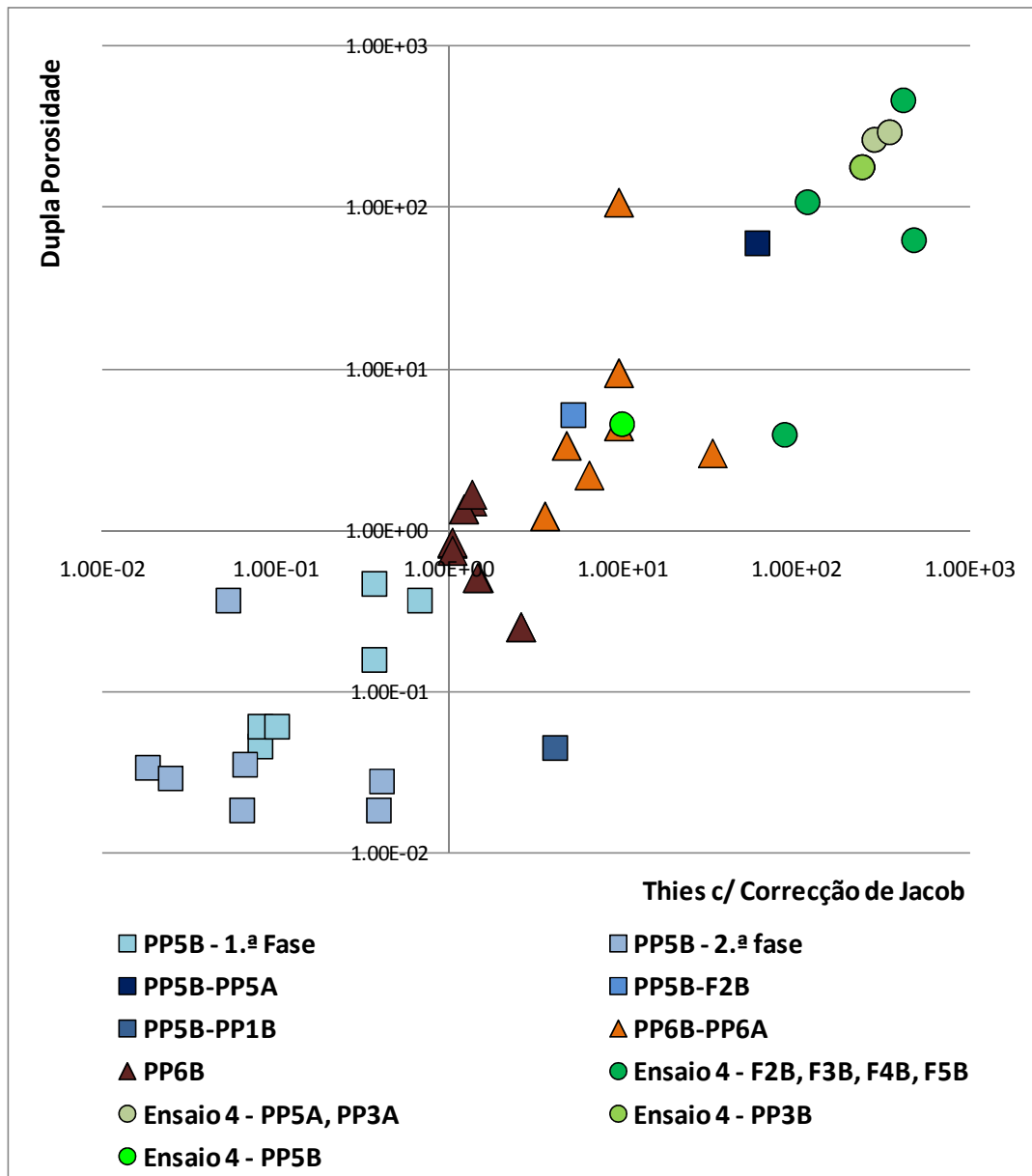


Figura 6.28. Correlação dos valores de transmissividade ( $\text{m}^2/\text{dia}$ ) obtidos pelos Métodos de “Theis com Correção de Jacob” e de “Dupla Porosidade” para a totalidade dos ensaios. Escalas logarítmicas e distinção entre ensaios.

De acordo com o gráfico da Figura 6.28, os valores de transmissividade resultantes da interpretação entre furos (PP5B – F2B ou P1-PP5B, por exemplo) são superiores aos obtidos única e exclusivamente para os furos de bombagem em si (PP5B e PP6B). Estas diferenças ainda se acentuam mais para os ensaios realizados entre a corta e a envolvente (resultados entre P1 com demais furos e poços, Tabela 6.3).

Tabela 6.3. Ensaio 4, valores de transmissividade ( $m^2/dia$ ), obtidos para furos que funcionam como piezômetros na envolvente à corta mineira, e cujos resultados foram possíveis validar e interpretar.

Ensaio 4	Tempo	Theis	DP
		T ( $m^2/dia$ )	T ( $m^2/dia$ )
P1	200 a 2880 min	23.20	13.90
P1-PP5B	200 a 2880 min	9.94	4.55
P1-F4B	200 a 2880 min	85.40	3.91
P1-F2B	200 a 2880 min	116.00	107.00
P1-PP3A	200 a 2880 min	282.00	264.00
P1-PP3B	200 a 2880 min	236.00	179.00
P1-PP5A	200 a 2880 min	340.00	294.00
P1-F3B	200 a 2880 min	408.00	463.00
P1-F5B	200 a 2880 min	476.00	62.10

Foram encontrados valores de transmissividade superiores nas interpretações a maior escala (Tabela 6.3), onde provavelmente caminhos preferenciais, como falhas compostas por filões com quartzo ou uma maior perpetuação e continuação entre fracturas ou, ainda, descontinuidades como as dos contactos entre granitos e micaxistos muito contribuirão para esta situação. Evidencias desta situação constata-se ao observarmos os resultados obtidos para os diversos furos (Tabela 6.3), para os poços P2, P3 e P4 (Tabela 6.4), e os furos situados nas imediações de P1 (S2A, S2B, S4A e S4B, conforme Tabela 6.5).

Os poços P2, P3 e P4 são localmente intersectados por falhas produtivas e os resultados obtidos são compatíveis com a existência, numa primeira fase, da contribuição nos escoamentos a maiores distâncias de tais falhas e, posteriormente, a redução nos valores de ensaio poderá significar uma maior contribuição da matriz porosa, do granito alterado, por vezes, conjugada com a formação aluvionar localmente existente, em que tais poços se encontram instalados.

Tabela 6.4. Ensaio 4, Valores de transmissividade ( $m^2/dia$ ) obtidos para os poços P1, P2, P3 e P4.

Ensaio 4	Tempo (min)	Theis	PD
		T ( $m^2/dia$ )	T ( $m^2/dia$ )
P1	10 a 200 min	41.60	24.50
P1	>200	24.40	4.11
P1-P2	10 a 200 min	106.00	106.00
P1-P2	>200	10.30	10.40
P1-P3	10 a 200 min	48.10	48.00
P1-P3	>200	7.73	9.59
P1-P4	10 a 200 min	77.30	76.80
P1-P4	>200	16.90	17.30

Tabela 6.5. Ensaio 4, Valores de transmissividade ( $\text{m}^2/\text{dia}$ ) obtidos para os furos S2A, S2b, S4A e S4B.

Ensaio 4	Tempo (min)	Theis	PD
		T ( $\text{m}^2/\text{dia}$ )	T ( $\text{m}^2/\text{dia}$ )
P1-S2A	10 a 200 min	38.90	38.60
P1-S2A	>200	11.10	10.90
P1-S2B	10 a 200 min	97.40	63.50
P1-S2B	>200	14.40	35.50
P1-S4A	10 a 200 min	108.00	126.00
P1-S4A	>200	10.70	9.45
P1-S4B	10 a 200 min	62.90	16.00
P1-S4B	>200	10.00	6.28

As interpretações de ensaios representativos de áreas mais restritas do maciço mostram haver localmente maior condicionamento por efeitos de matriz, seja de natureza mais argilosa nas zonas mais alteradas, seja devida aos próprios blocos graníticos, com valores inferiores como é o caso dos resultados para os ensaios em PP5B e PP6B já previamente discutidos.

Na presente campanha, com áreas de ensaio superiores, os resultados substancialmente mais altos das transmissividades evidenciam a existência de estruturas que funcionarão como caminhos preferenciais e que terão certamente sido abrangidos pelos ensaios. Acresce que, as áreas de contacto entre diferentes fácies litológicas, nomeadamente entre micaxistos e granitos terão, igualmente, sido abrangidas por estes ensaios, sabendo-se que estas constituem locais onde os escoamentos se encontram facilitados. Por sua vez, e, acrescendo, é de se esperar neste tipo de fácies - micaxistos e migmatitos - a existência de um meio com maiores permeabilidades e mais heterogéneo em virtude dos efeitos de transição que proporcionará um incremento nos valores de transmissividade.

#### 6.1.4 CONCLUSÕES E SÍNTESE DOS MELHORES RESULTADOS

Os resultados obtidos no ensaios em PP5B, considerando os níveis de alteração em profundidade indicados na Figura 6.29 e os pressupostos anteriormente descritos relativos a este ensaio poderão ter as seguintes duas possíveis interpretações:

- Valores de transmissividade associados à litologia “Granito Porfíróide” (Lito 1) nas zonas em que o maciço se encontra francamente alterado (W4), composto por uma matriz com efeitos de alteração sericítica e argilítica, com funcionamento hidráulico dado essencialmente por porosidade (valores destacados a cor rosa na Tabela 6.6);
- Valores de transmissividade da litologia “Granito Porfíróide” (Lito 1) e, em certos locais, a maiores profundidades, do “Pegmatito” (Lito 6), em zonas em que o maciço se encontra menos alterado a são, e, portanto, com funcionamento hidráulico (valores destacados a cor azul na Tabela 6.6) preferencialmente dado pelas características locais da fracturação, pela

ocorrência e características de falhas e, ainda, pela presença de zona preferencial para os escoamentos, no contacto entre o maciço mais alterado e menos alterado.

PP5B		PP1B		F2B		PP5A	
Prof (m)	W4 (%)	Prof (m)	W4 (%)	Prof (m)	W4 (%)	Prof (m)	W4 (%)
0	100%	0	100%	0	100%	0	100%
5	24%	5	100%	5	100%	5	100%
10	25%	10	100%	10	100%	10	100%
15	18%	15	100%	15	100%	15	100%
20	100%	20	100%	20	100%	20	100%
25	100%	25	100%	25	100%	25	100%
30	100%	30	100%	30	9%	30	100%
35	94%	35	56%	35	0%		
40	29%	40	86%	40	0%		
45	14%	45	100%	45	0%		
50	0%	50	100%	50	0%		
55	30%	55	100%	55	0%		
60	4%	60	100%	60	91%		
65	8%	65	100%	65	89%		
70	0%	70	52%	70	0%		
75	0%	75	0%				

Figura 6.29. Níveis do maciço muito alterado (w4) em profundidade dos furos PP5B, PP1B, F2B e PP5A, com destaque das áreas dos furos que apresentam tubo aberto e, portanto, ensaiadas no decorrer da bombagem.

Tabela 6.6. Resultados de transmissividade seleccionados (a cor azul) para o ensaio realizado no furo PP5B e possíveis interpretações.

CONDIÇÕES DE ENSAIO				THEIS C/ CORRECÇÃO JACOB	DUPLA POROSIDADE	POSSÍVEL INTERPRETAÇÃO		
Ensaio		Tempo (min)	Furos/ Poços	T (m <sup>2</sup> /dia)	T (m <sup>2</sup> /dia)	LITOLOGIA	ALTERAÇÃO	DESCRIÇÃO DA SITUAÇÃO
1	Ensaio PP5B	< 30	PP5B	0.67	0.37			Valores de ensaio não considerados
1	Ensaio PP5B	< 30	PP5B	0.37	0.47			
1	Ensaio PP5B	< 30	PP5B	0.37	0.16			
2	Ensaio PP5B	30 - 150	PP5B	0.08	0.05	Lito 1 - Granito Porfíroide	W4	Granito grão grosseiro porfíroide. Maciço bastante alterado (W4) com efeitos devidos à presença de matriz sericitica e argilitica
2	Ensaio PP5B	30 - 150	PP5B		0.08			
2	Ensaio PP5B	30 - 150	PP5B	0.06				
2	Ensaio PP5B	30 - 150	PP5B	0.10				
2	Ensaio PP5B	30 - 150	PP5B	0.05				
2	Ensaio PP5B	30 - 150	PP5B	0.06				
2	Ensaio PP5B	30 - 150	PP5B	0.07				
3	Ensaio PP5B	219 - 239	PP5B	0.05	0.37			
3	Ensaio PP5B	219 - 239	PP5B	0.06	0.02			
4	Ensaio PP5B	239 - 314	PP5B	0.41	0.03			
4	Ensaio PP5B	239 - 314	PP5B	0.40	0.02			
4	Ensaio PP5B	239 - 314	PP5B	0.07	0.04			
4	Ensaio PP5B	239 - 314	PP5B	0.002	0.001			
4	Ensaio PP5B	239 - 314	PP5B - PP5A	59.10	59.50	Lito 1 - Granito Porfíroide	W1, W2, W3	Granito grão grosseiro porfíroide. Funcionamento hidráulico preferencialmente por fracturação (apesar de poder ocorrer níveis de maciço W4)
4	Ensaio PP5B	239 - 314	PP5B - PP5A	5.45	1.65			
4	Ensaio PP5B	239 - 314	PP5B - F2B	4.89				
4	Ensaio PP5B	239 - 314	PP5B - F2B	5.15	5.22			
4	Ensaio PP5B	239 - 314	PP5B - F2B	0.67	0.67	Lito 1 - Granito Porfíroide	W4	Granito grão grosseiro porfíroide. Maciço bastante alterado (W4) com efeitos devidos à presença de matriz sericitica e argilitica
4	Ensaio PP5B	239 - 314	PP5B - PP1B	0.05				
4	Ensaio PP5B	239 - 314	PP5B - PP1B	4.10	0.05			
4	Ensaio PP5B	239 - 314	PP5B - PP1B	0.13	0.05			
CONDIÇÕES DE ENSAIO				THEIS C/ CORRECÇÃO JACOB- RECUPER.	DUPLA POROSIDADE- RECUPER.	POSSÍVEL INTERPRETAÇÃO		
	Ensaio	Tempo (min)	Furos/ Poços	T (m <sup>2</sup> /dia)	T (m <sup>2</sup> /dia)	LITOLOGIA	ALTERAÇÃO	DESCRIÇÃO DA SITUAÇÃO
5	Ensaio PP5B	219 - 384	PP5B	0.02	0.03	Lito 1 - Granito Porfíroide	W4	Granito grão grosseiro porfíroide. Maciço bastante alterado (W4) com efeitos devidos à presença de matriz sericitica e argilitica
5	Ensaio PP5B	219 - 384	PP5B	0.02	0.03			

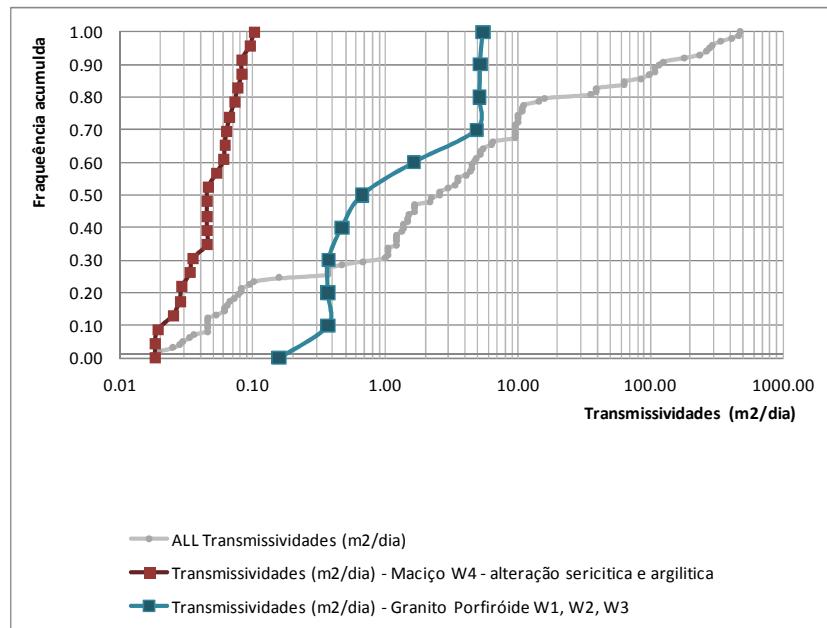


Figura 6.30. Frequências acumuladas dos resultados de transmissividade seleccionados e possíveis interpretações para o caso do ensaio de bombeamento realizado no furo PP5B.

Os resultados obtidos e seleccionados para o ensaio realizado no furo PP6B corresponderão a valores de transmissividade da litologia “Granito Biotítico”, em zonas onde o maciço funcionará essencialmente por fracturação e em que a perpetuação de escoamentos a maiores distâncias se encontrará fortemente condicionada às características da fracturação (nomeadamente grau de interconexão) e à presença de outras estruturas que possam ser fonte de alimentação, tais como zonas de brecha ou filões quartzosos.

Tabela 6.7. Resultados de transmissividade seleccionados (a cor azul) para o ensaio realizado no furo PP6B e possíveis interpretações.

CONDIÇÕES DE ENSAIO			THEIS C/ CORRECÇÃO JACOB	DUPLA POROSIDADE	POSSÍVEL INTERPRETAÇÃO		
Ensaio	Tempo (min)	Furos/ Poços	T (m²/dia)	T (m²/dia)	LITOLOGIA	ALTERAÇÃO	DESCRIÇÃO DA SITUAÇÃO
1	Ensaio PP6B	<7	PP6B	1.7	Lito2 - Granito Biotítico	W1,W2,W3	Granito Biotítico Grão Médio a Fino Maciço muito pouco alterado Funcionamento hidráulico preferencialmente por fracturação
1	Ensaio PP6B	10-178	PP6B	1.2			
1	Ensaio PP6B	50-179	PP6B	1.0			
2	Ensaio PP6B	<179	PP6B	1.2			
2	Ensaio PP6B	<179	PP6B	1.5			
2	Ensaio PP6B	<179	PP6B	1.3			
2	Ensaio PP6B	<179	PP6B	1.4			
2	Ensaio PP6B	<179	PP6B	2.2			
2	Ensaio PP6B	100-204	PP6B	1.5			
2	Ensaio PP6B	100-204	PP6B	0.5			
2	Ensaio PP6B	100-204	PP6B	1.5			
3	Ensaio PP6B	286-360	PP6B	2.6			
3	Ensaio PP6B	286-360	PP6B	0.3			
3	Ensaio PP6B	286-360	PP6B	2.6			
4	Ensaio PP6B	>391	PP6B	1.1			
4	Ensaio PP6B	>391	PP6B	0.8	Lito2 - Granito Biotítico	W1,W2,W3	Granito Biotítico Grão Médio a Fino Maciço muito pouco alterado Funcionamento hidráulico preferencialmente por fracturação
4	Ensaio PP6B	>391	PP6B	0.9			
4	Ensaio PP6B	>391	PP6B	1.1			
4	Ensaio PP6B	>391	PP6B	0.8			
4	Ensaio PP6B	>391	PP6B	1.1			
4	Ensaio PP6B	>391	PP6B	0.7			
2	Ensaio PP6B	50-179	PP6B - PP6A	4.6			
2	Ensaio PP6B	<179	PP6B - PP6A	9.5			
2	Ensaio PP6B	<179	PP6B - PP6A	9.4			
2	Ensaio PP6B	<179	PP6B - PP6A	9.5			
2	Ensaio PP6B	<179	PP6B - PP6A	4.4			
2	Ensaio PP6B	<179	PP6B - PP6A	9.5			
2	Ensaio PP6B	<179	PP6B - PP6A	108.0			
2	Ensaio PP6B	<179	PP6B - PP6A	9.9			
2	Ensaio PP6B	100-204	PP6B - PP6A	4.7			
2	Ensaio PP6B	100-204	PP6B - PP6A	3.3			
3	Ensaio PP6B	286-360	PP6B - PP6A	32.8			
3	Ensaio PP6B	286-360	PP6B - PP6A	3.0			
3	Ensaio PP6B	286-360	PP6B - PP6A	6.4			
3	Ensaio PP6B	286-360	PP6B - PP6A	2.2			
4	Ensaio PP6B	>391	PP6B - PP6A	3.6			
4	Ensaio PP6B	>391	PP6B - PP6A	1.2			
4	Ensaio PP6B	>391	PP6B - PP6A	3.6			
4	Ensaio PP6B	>391	PP6B - PP6A	4.0			

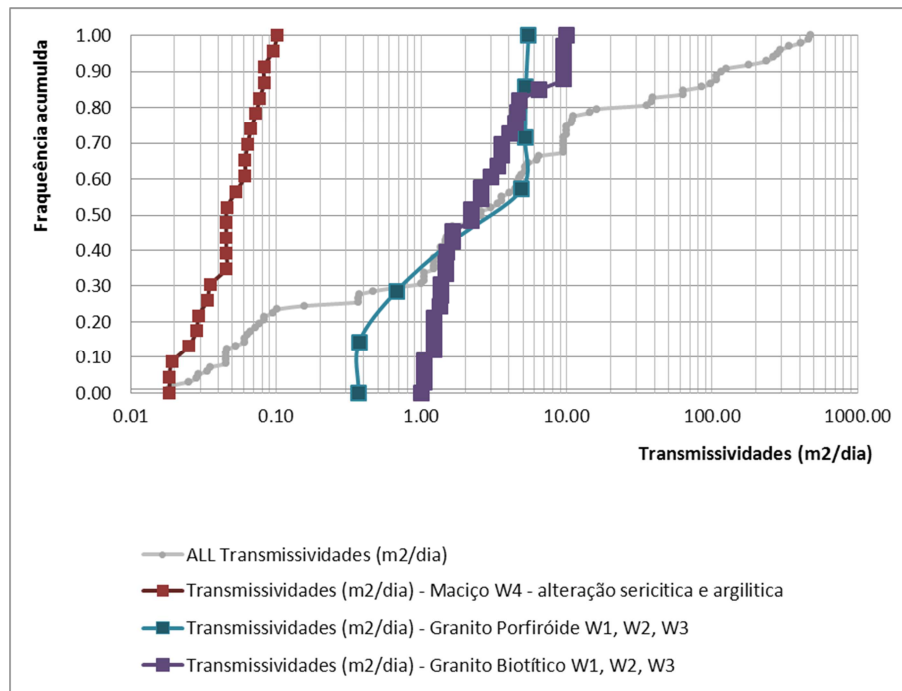


Figura 6.31. Frequências acumuladas dos resultados de transmissividade seleccionados e possíveis interpretações para o caso dos ensaios de bombagem realizados nos furos PP5B e PP6B

O ensaio realizado no Poço P1 (Ensaio 4) poderá explicar, em parte, comportamentos mais gerais e devidos à existência de estruturas de dimensão espacial relevante que funcionarão na área em estudo como canais preferenciais ao escoamento e que serão, provavelmente, a razão dos mais acentuados rebaixamentos detectados, pelos menos, nas primeiras fases do ensaio. Tais estruturas serão falhas compostas por filões quartzosos ou zonas de granito brechificado (conforme selecção indicada a cor laranja na Tabela 6.8).

No caso dos resultados verificados nos furos S2A, S2B, S4A, e S4B, pelo menos, em parte, os resultados encontrados poderão ser eventualmente associáveis a áreas compostas preferencialmente pelo remanescente do xenólito de metassedimentos que foi explorado, essencialmente compostas por “Micaxistos” e “Migmatitos”, com direcção principal da xistosidade subvertical, e efeitos contacto e de transição, uma vez que estas litologias são cortadas por pequenas espessuras de “Granito Porfírido” e/ou “Granito Biotítico”, consoante a localização mais a Norte ou a Sul dos furos.



Tabela 6.8 Resultados de transmissividade seleccionados para o caso do Ensaio 4 realizado no poço P1 e possíveis interpretações.

CONDIÇÕES DE ENSAIO			THEIS C/ CORRECÇÃO JACOB	DUPLA POROSIDADE	POSSÍVEL INTERPRETAÇÃO		
Ensaio	Tempo (min)	Furos/ Poços	T (m <sup>2</sup> /dia)	T (m <sup>2</sup> /dia)	LITOLOGIA E ESTRUTURAS	ALTERAÇÃO	DESCRIÇÃO DA SITUAÇÃO
Ensaio 4	200 a 2880 min	P1-F4B	85.40	3.91	Lito 5- Brechas graníticas; Falhas, Contactos	W1,W2,W3	Presença de grandes estruturas com maior capacidade de condução de escoamentos a maiores distâncias  Brechas graníticas  Contactos  Falhas
Ensaio 4	200 a 2880 min	P1-F2B	116.00	107.00	Lito 5- Brechas graníticas; Falhas, Contactos		
Ensaio 4	200 a 2880 min	P1-PP3B	236.00	179.00	Lito 5- Brechas graníticas; Falhas, Contactos		
Ensaio 4	200 a 2880 min	P1-F3B	408.00	463.00	Lito 5- Brechas graníticas; Falhas, Contactos		
Ensaio 4	200 a 2880 min	P1-PP5B	9.94	4.55	Falhas, Contactos (mas com algum efeito barreira de matriz argílica)		
Ensaio 4	200 a 2880 min	P1-PP3A	282.00	264.00	Falhas, Contactos		
Ensaio 4	200 a 2880 min	P1-PP5A	340.00	294.00	Falhas, Contactos		
Ensaio 4	200 a 2880 min	P1-F5B	476.00	62.10	Falhas, Filão com Quartzo		
Ensaio 4	10 a 200 min	P1-S2A	38.90	38.60	Lito3 - Micaxisto (+ Lito 1 Grn Porfiróide)	W1,W2,W3	Presença de grandes estruturas com maior capacidade de condução de escoamentos a maiores distâncias  Contactos  Transições entre várias litologias  Falhas  Brechas graníticas
Ensaio 4	>200	P1-S2A	11.10	10.90	Lito3 - Micaxisto (+ Lito 1 Grn Porfiróide)		
Ensaio 4	10 a 200 min	P1-S2B	97.40	63.50	Lito3 - Micaxisto (+ Lito 1 Grn Porfiróide)		
Ensaio 4	>200	P1-S2B	14.40	35.50	Lito3 - Micaxisto (+ Lito 1 Grn Porfiróide)		
Ensaio 4	10 a 200 min	P1-S4A	108.00	126.00	Lito 5- Brechas graníticas; Falhas, Contactos		
Ensaio 4	>200	P1-S4A	10.70	9.45	Lito4 - Migmatito (+ Lito 1 Grn Porf+ Lito2 Gr Biot)		
Ensaio 4	10 a 200 min	P1-S4B	62.90	16.00	Litologias c/ transições; Contactos; Falhas		
Ensaio 4	>200	P1-S4B	10.00	6.28	Litologias c/ transições; Contactos; Falhas		

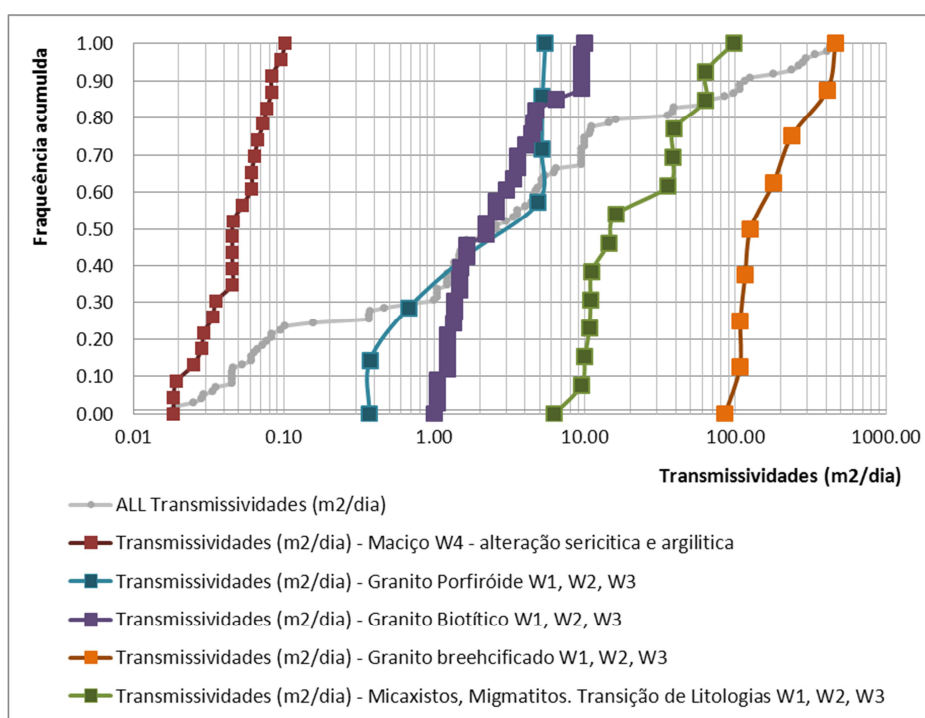


Figura 6.32. Frequências acumuladas dos resultados de transmissividade seleccionados e possíveis interpretações para o caso dos ensaios de bombagem realizados nos furos PP5B e PP6B e no Poço P1 (Ensaio 4)

Face ao exposto nos capítulos anteriores, apresentam-se, na Figura 6.33, aqueles resultados dos ensaios de bombagem que se seleccionaram porque se julga serem estes os mais consentâneos com a realidade do maciço rochoso em estudo. Esta selecção efectuou-se com base em critérios respeitantes

às variáveis “Litologia”, “Alteração” e, indirectamente, “Fracturação” o que permitiu que em fase subsequente se procedesse à simulação de modelos 3D de transmissividade, por via de cruzamento de informação obtida deterministicamente e por simulação estocástica, conforme se explica no capítulo seguinte.

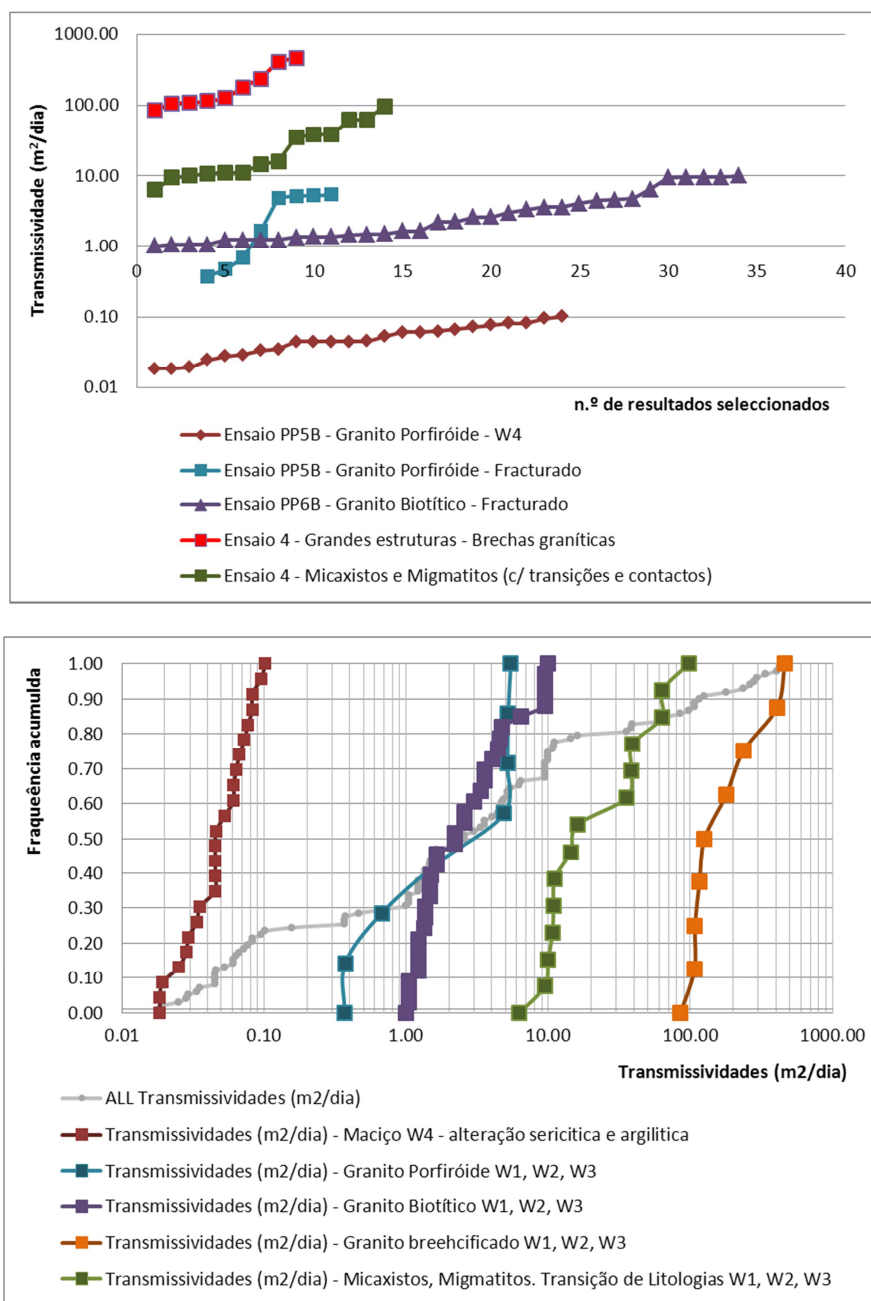


Figura 6.33. Síntese e frequências acumuladas dos resultados de transmissividade (m²/dia) seleccionados e possíveis interpretações para o caso dos ensaios de bombagem realizados nos furos PP5B, PP6B e do Ensaio 4 efectuado no poço P1.

## 6.2 SIMULAÇÃO DE MODELOS 3D DA TRANSMISSIVIDADE

Face às diferenças encontradas nos resultados de transmissividade resultantes das interpretações de ensaios de bombagem realizadas e anteriormente discutidas, considerou-se essencial, como pressuposto de partida, que na simulação das matrizes 3D das transmissividades fossem individualizados os troços de maciço muito alterado das demais localizações, em que o funcionamento hidráulico é fortemente condicionado pela matriz rochosa, menos alterada e, portanto, dependente das características da fracturação e das possíveis inter-relações entre os escoamentos processados nas fracturas e nos blocos da matriz.

Tal pressuposto implica necessariamente que nos modelos 3D gerados, os corpos representativos da “Transmissividade da Matriz Rochosa Muito Alterada” e da “Transmissividade da Matriz Rochosa são a pouco alterada” sejam disjuntos, condição assegurada pela metodologia geoestatística seguida na simulação 3D das variáveis “Litologia”, “Alteração” e do “Número de Fracturas” já oportunamente apresentadas e discutidas.

Relativamente à simulação dos valores de “Transmissividade do Maciço Muito Alterado (W4)” recorreu-se ao processo de simulação de condicionamento independente – Simulação de Campos de Probabilidade (SCP) -, em que a simulação é independente do processo de condicionalização aos valores experimentais.

Foram geradas 300 simulações de transmissividade que resultam, pois, do contributo, em conjunto, das variáveis simuladas e dos valores de transmissividade determinados com base nos ensaios de bombagem, por via dos seguintes procedimentos adoptados:

- Simulação da transmissividade 3D da matriz rochosa através do “Cruzamento de Histogramas” dos dados experimentais de transmissividade e das imagens simuladas respeitantes ao “Número de Fracturas” e à variável “Litologia”.
- Simulação da transmissividade 3D do maciço rochoso muito alterado, com simulação com condicionamento independente por via da aplicação do método de Simulação de Campos de Probabilidade, com base nas matrizes 3D da variável “Alteração” e subsequente condicionamento aos histogramas dos dados experimentais da transmissividade obtidos para a área do maciço muito alterado (W4).

Presume-se, assim, que o valor de transmissividade de cada célula que constitui os modelos 3D tenha sido simulado com condicionamento aos valores experimentais dos ensaios de bombagem, ponderados de acordo com as probabilidades dessa mesma célula representar certa “Litologia”, sob um determinado grau *Alteração* e, quando aplicável, com certo *Número de Fracturas* não preenchidas (Figura 6.34).

Note-se que a melhor visualização das imagens de transmissividade simuladas consegue-se recorrendo a escala logarítmica o que se coaduna com os resultados obtidos da interpretação dos ensaios de bombagem, igualmente representados sob este tipo de escalas quando comparamos valores característicos de diferentes litologias e condições de fracturação.

Aspectos relevantes da heterogeneidade deste meio como os feitos de barreira que podem ser induzidos no meio, em virtude da existência de áreas fortemente alteradas, com efeitos de sericitização e argilização do maciço, ou efeitos de maior perpetuação de escoamentos, localizados, devidos à existência de brechas, filões mais fracturados, áreas do maciço intensamente fracturadas, ou litologias mais permeáveis (como é o caso dos micaxistos e das fácies de transição - migmatitos) encontram-se, assim, introduzidos nos modelos e são repercutidos nas malhas de blocos de transmissividade que constituem *inputs* fundamentais para a construção dos modelos hidrogeológicos 3D.

Outro aspecto curioso e de relevar é o da necessidade de se projectarem as imagens da transmissividade em escala logarítmica (Figura 6.35 a 6.37), necessidade igualmente sentida na fase de exploração dos resultados dos ensaios de bombagem, quando se pretende mostrar todos os resultados em simultâneo, dada a alta discrepância detectada entre os valores, que podem variar desde mínimos na ordem dos 0,01 m<sup>2</sup>/dia a máximos, extremos, na ordem dos de 400 a 500 m<sup>2</sup>/dia.

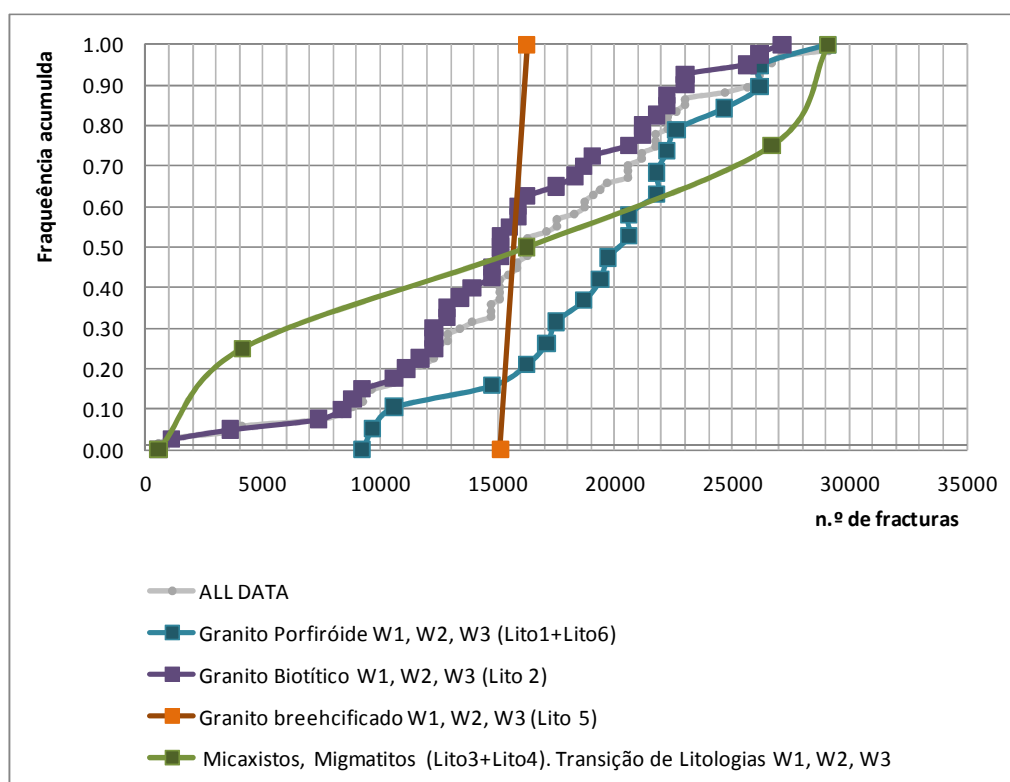


Figura 6.34. Histogramas cumulativos do número de fracturas por classe de alteração e litologia, com a mesma discriminação da obtida com os ensaios de bombagem.

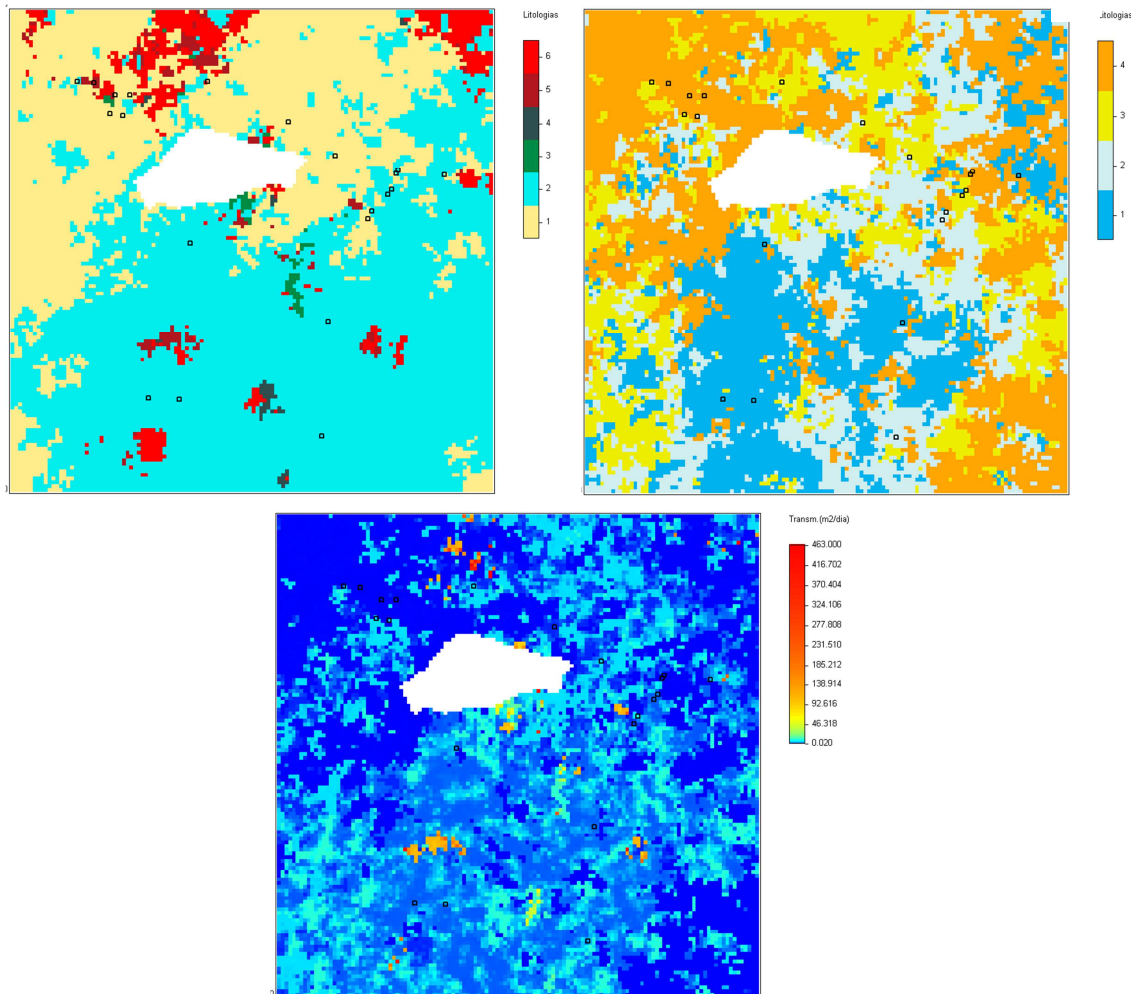


Figura 6.35. Imagem simulada da transmissividade (em baixo), expressa em escala logarítmica, e imagens simuladas homólogas da Litologia (em cima, à esquerda) e da Alteração (em cima, à direita). Vistas do Plano XY à profundidade Z=387,5m.

Na Figura 6.35 apresenta-se o resultado de uma das 300 imagens de Transmissividade simuladas, expressa em escala logarítmica, comparando-se a mesma com as correspondentes imagens simuladas homólogas da Litologia e da Alteração. Perfis de idêntica analogia são, igualmente, apresentados na Figura 6.36 e na Figura 6.37. Da observação destas imagens constata-se correspondências espaciais entre as diferentes imagens simuladas, em que aos níveis de alteração mais intensa, preferencialmente associados à área dos “Granitos porfiróides”, às áreas mais alteradas e, inclusivamente, às áreas mais sujeitas a efeitos de sericitização e argilitização mais intensas correspondem valores de Transmissividade mais baixos. Inversamente, e conforme seria de se esperar, aos valores mais altos de Transmissividade encontram-se associadas as fácies litológicas que tendencialmente se apresentam mais fracturadas.

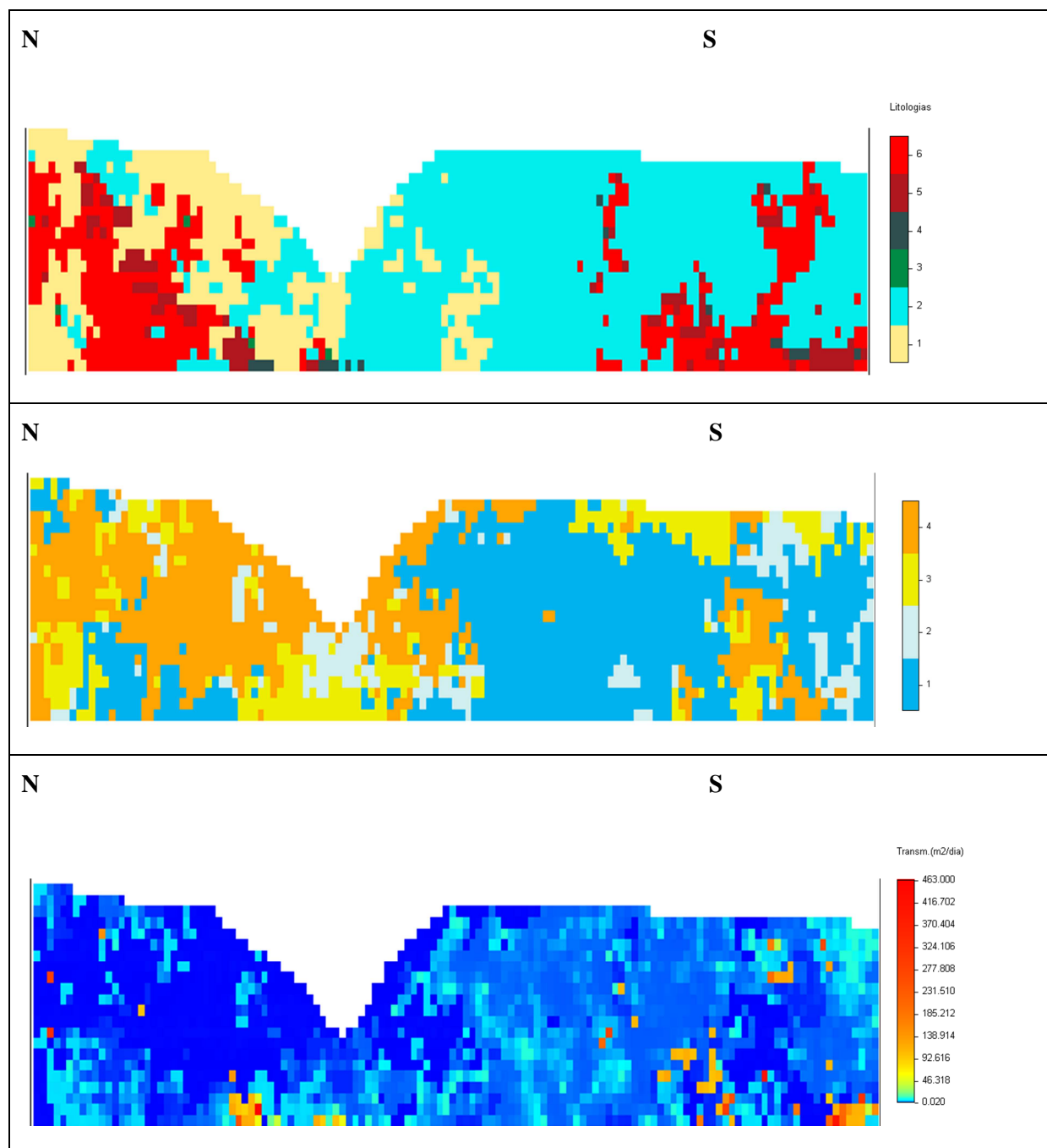


Figura 6.36. Imagem simulada da transmissividade (em baixo), expressa em escala logarítmica, e imagens simuladas homólogas da Litologia e da Alteração. Vistas do Plano YZ com X=230300m.

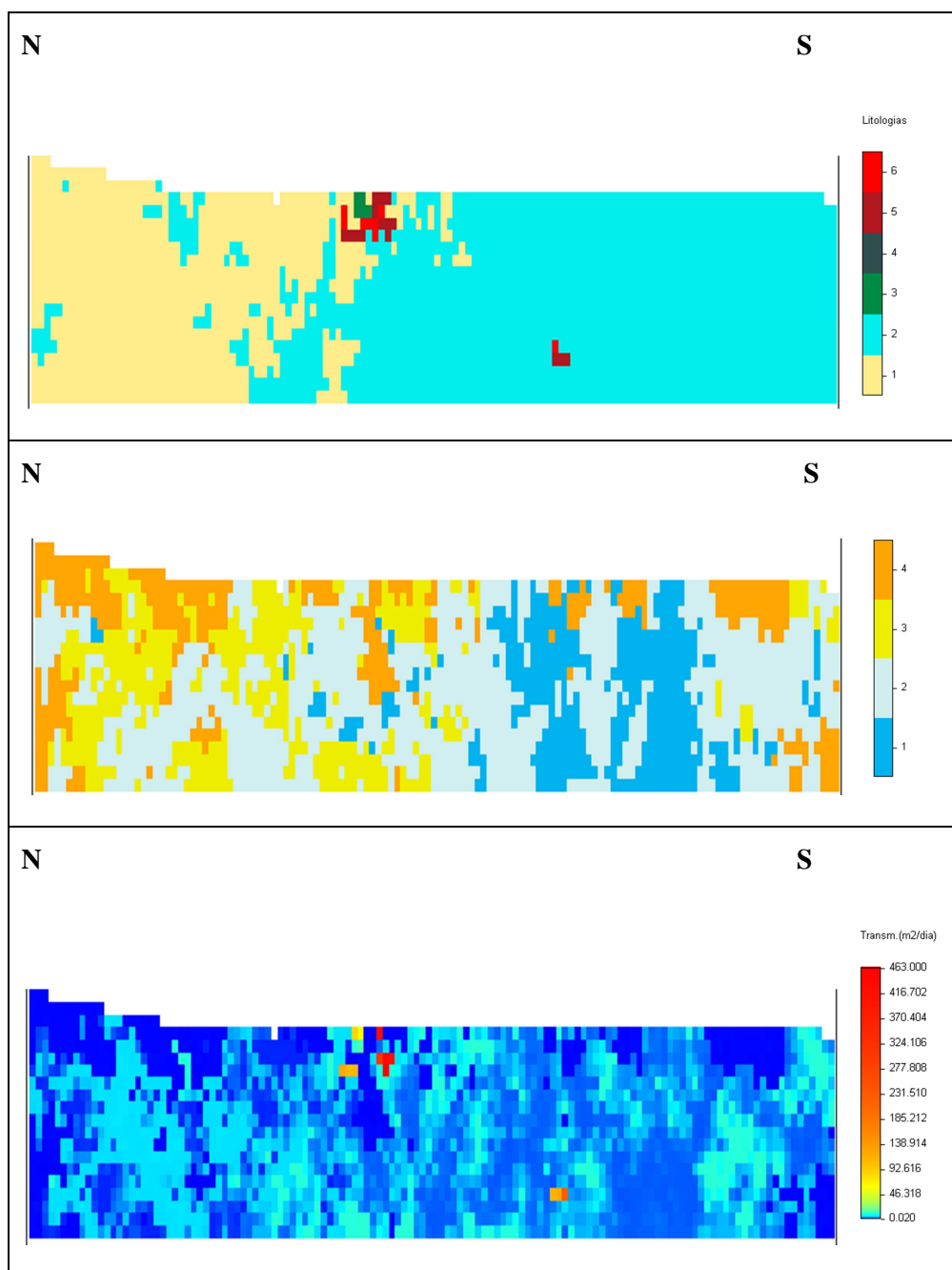


Figura 6.37. Imagem simulada da transmissividade (em baixo), expressa em escala logarítmica, e imagens simuladas homólogas da Litologia e da Alteração. Vistas do Plano YZ com X=230300m.

Os resultados dos 300 histogramas cumulativos dos resultados de transmissividade simulados (Figura 6.38) evidenciam a grande proximidade de resultados entre diferentes populações estatísticas que se distinguirão entre si, não pela sua estatística, mas sim por diferenças nos respectivos arranjos espaciais. O caso de estudo, ao seguir a metodologia adoptada, permite, assim explorar diferentes cenários ou possibilidades a 3D que, na globalidade, apresentam igual significado em termos estatísticos.

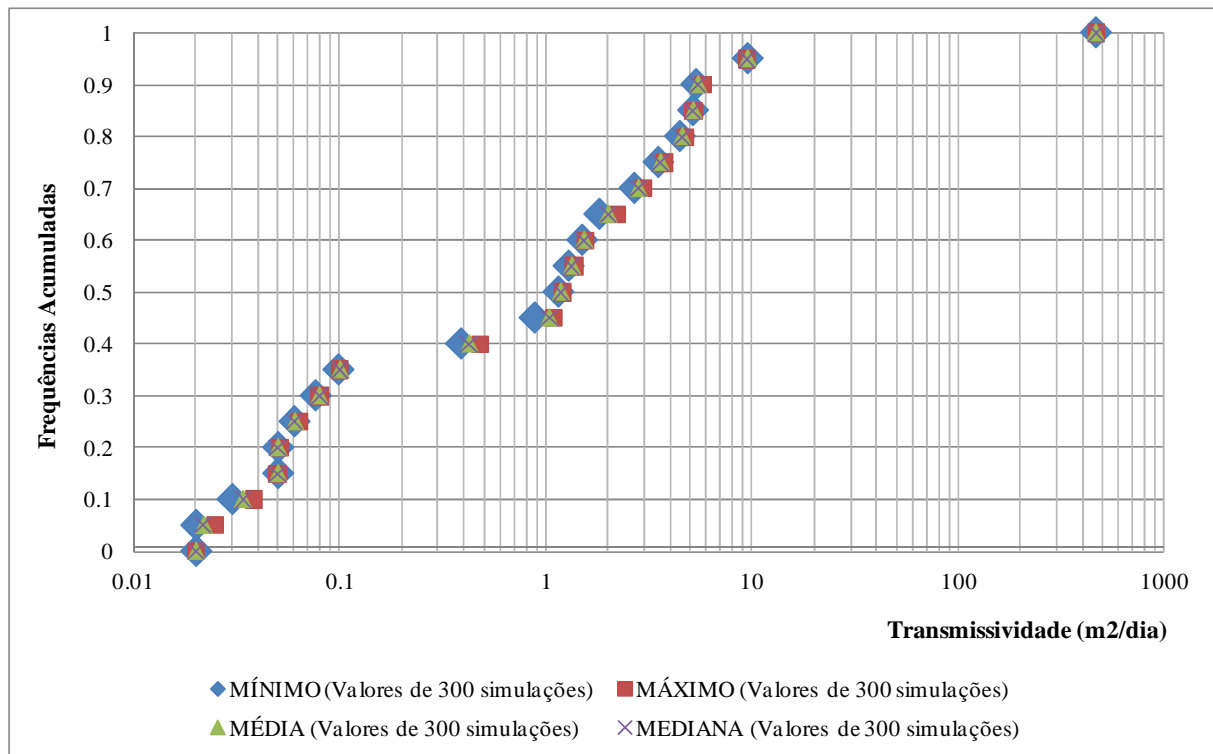


Figura 6.38. Estatísticos dos 300 histogramas cumulativos dos resultados de transmissividade simulados.

As 300 realizações mostram a existência de um elevado nível de heterogeneidade do maciço estudado que se reflecte nas suas capacidades e modo de transmissão dos escoamentos. Esta heterogeneidade verifica-se em todas as direcções do espaço, seja lateralmente, seja em profundidade, constituindo o resultado das diferenças acentuadamente demarcadas a curtas distâncias das diferentes características do maciço estudadas, com situações em que, inclusivamente, as passagens no espaço a 3D entre diferentes fases são, por vezes, bruscas.

Da observação dos mapas de transmissividade obtidos verifica-se a existência de áreas muito localizadas, espacialmente muito específicas e de reduzida dimensão, por via das quais a perpetuação dos escoamentos se encontrará bastante facilitada. Estas áreas encontram-se inseridas numa matriz rochosa amplamente distribuída e acentuadamente distinta do ponto de vista da capacidade de



perpetuação dos escoamentos, em que os valores de transmissividade são substancialmente inferiores, por vezes, em mais do que uma ordem de magnitude.

Estaremos na presença de um maciço bastante heterogêneo, composto por *bolsadas*, por vezes, ligadas entre si por *canais* de dimensão e localização restrita que possibilitarão a perpetuação de escoamentos de um modo demarcadamente irregular e de forma tortuosa (Figura 6.39, Figura 6.40, Figura 6.41 e Figura 6.42). Em termos espaciais, este funcionamento hidrogeológico muito específico encontra-se bem patente nos mapas binários que podem ser produzidos a partir modelos 3D simulados da transmissividade, considerando-se diferentes *thresholds*, estabelecidos de acordo com os resultados calculados deterministicamente a partir dos ensaios de bombagem, que se reproduzem globalmente a uma escala logarítmica, por variarem entre valores de 0,01 m<sup>2</sup>/dia a mais de 400 m<sup>2</sup>/dia, conforme discutido e apresentado no capítulo 6.

Os escoamentos verificar-se-ão, pois, entre pequenas áreas preferenciais – *bolsadas* – que terão entre si, e apenas, em alguns casos específicos, ligações muito restritas dadas especialmente pela presença de certas litologias ou estruturas específicas como filões de quartzo esmagado e/ou bastante fracturado ou brechas graníticas, e/ou dadas por uma matriz rochosa que localmente apresente altos índices de fracturação (Figura 6.39, Figura 6.40, Figura 6.41 e Figura 6.42). As fracturas determinantes na perpetuação dos escoamentos encontram-se, provavelmente, pouco preenchidas, e terão, necessariamente, de apresentar um significativo grau de conectividade entre si para que possam apresentar maior capacidade de escoamento (Chavez-Kus e Salamuni, 2008).

Igualmente, a fracturação e estruturas de maior dimensão que apresentam orientação sub-vertical, características da região em que se insere a área de estudo, deverão desempenhar um papel importante em todo o dinamismo existente na região e, inclusivamente, na possibilidade dos escoamentos poderem ser perpetuados até maiores profundidades neste domínio de morfologia irregular.

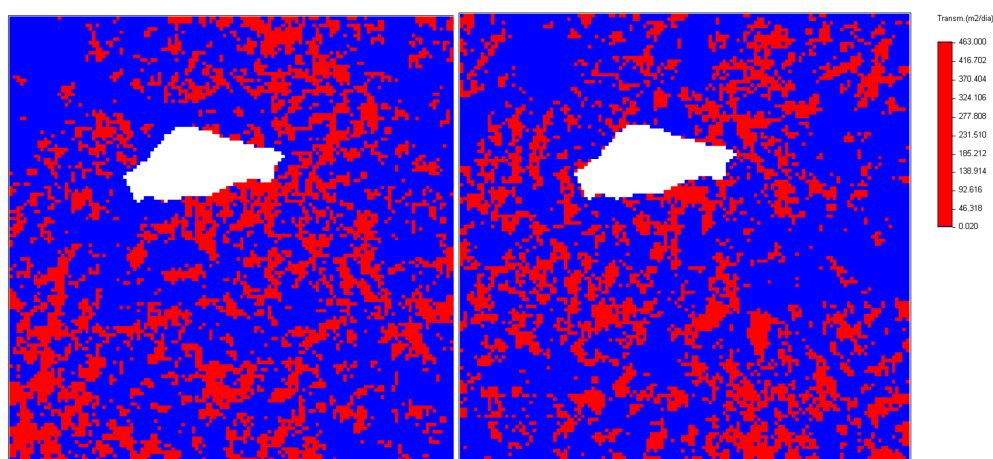


Figura 6.39. Mapas binários de duas imagens simuladas da transmissividade, expressa em escala logarítmica e *threshold* de 3 m<sup>2</sup>/dia. Vistas do Plano XY à profundidade de cota Z= 387,5m.

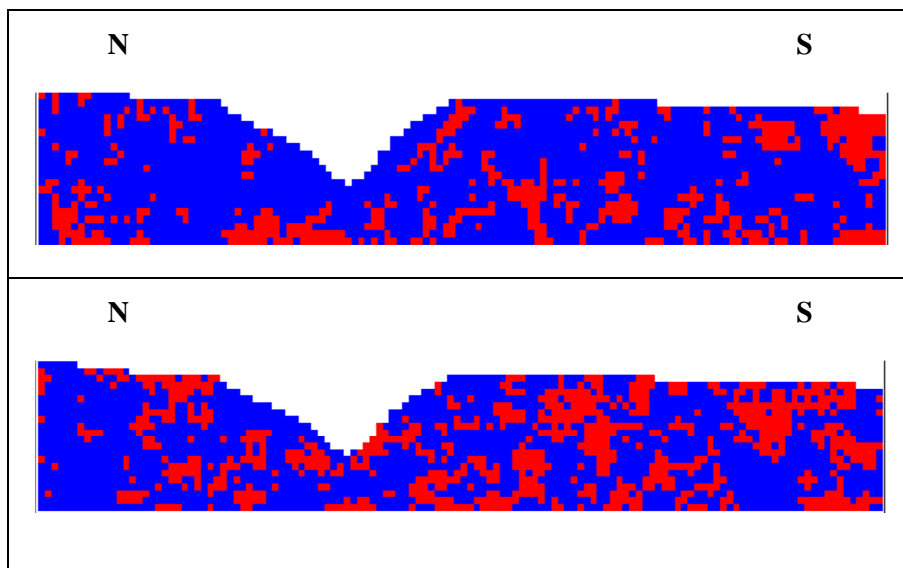


Figura 6.40. Mapas Binários de duas imagens simuladas da transmissividade, expressa em escala logarítmica e *valor de corte* de  $3 \text{ m}^2/\text{dia}$ . Vistas do Plano YZ com  $M=230300$ .

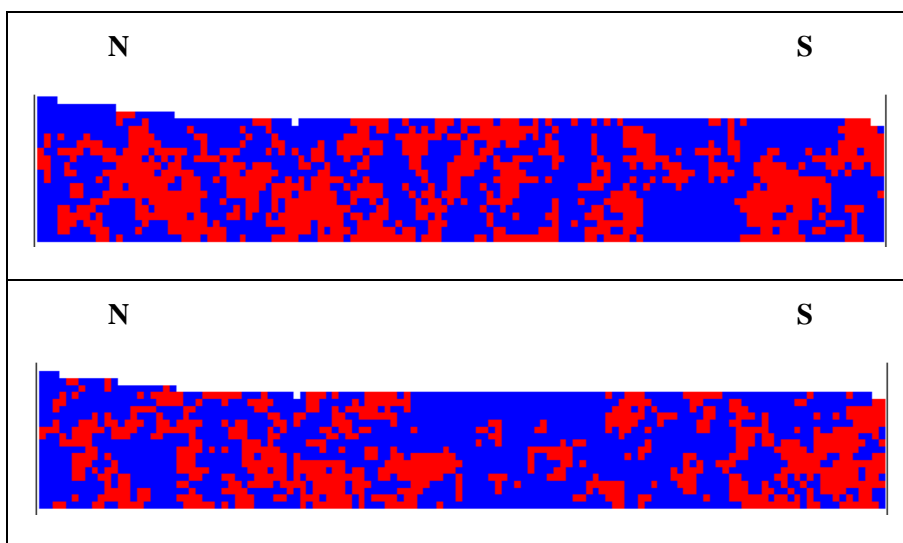


Figura 6.41. Mapas Binários de duas imagens simuladas da transmissividade, expressa em escala logarítmica e *valor de corte* de  $3 \text{ m}^2/\text{dia}$ . Vistas do Plano YZ com  $M=230500$ .

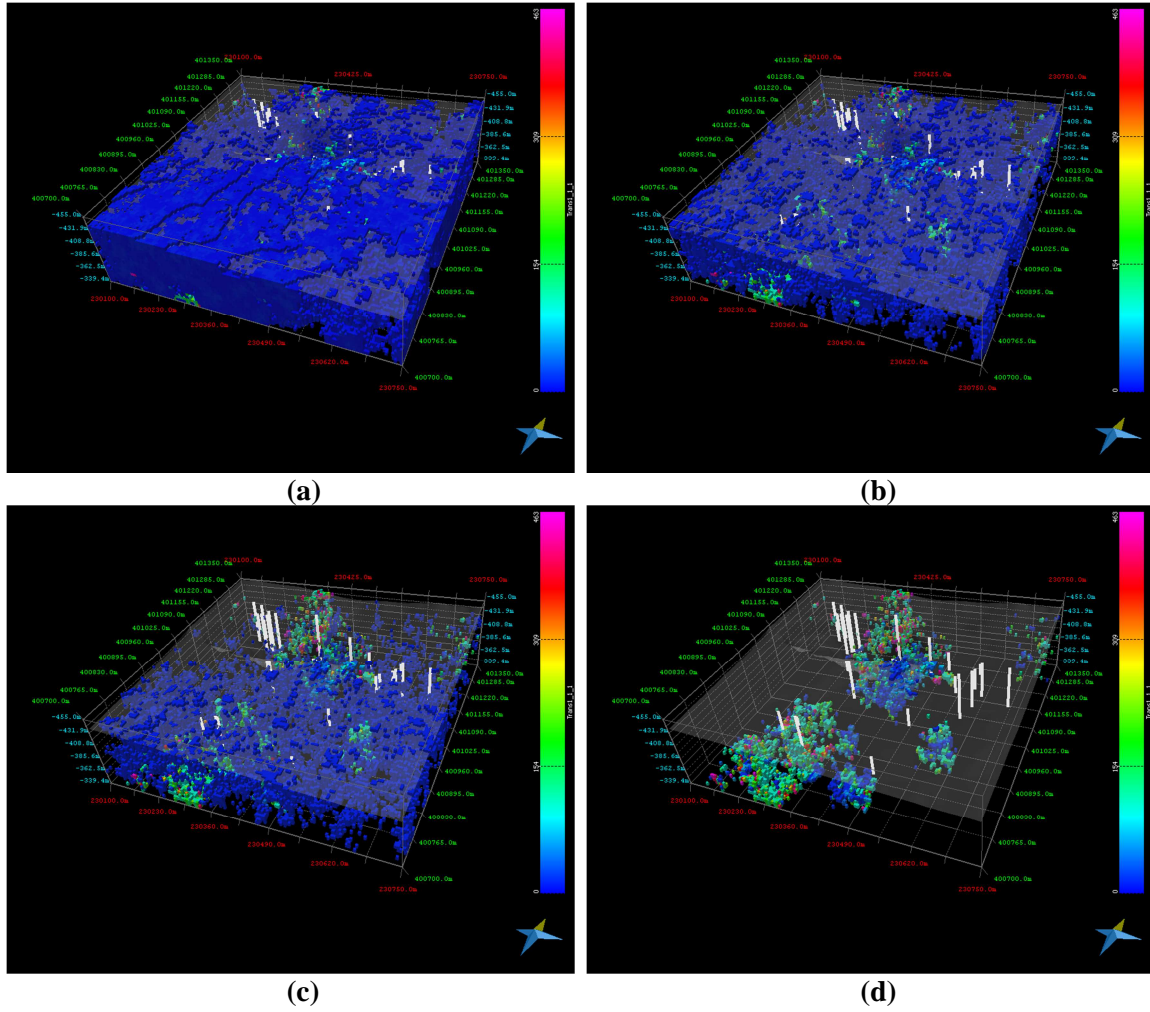


Figura 6.42. Visualização 3D de uma simulação da transmissividade, expressa em escala logarítmica e com indicação dos blocos unitários de dimensão 5x5x5 m³ acima de distintos valores: a) transmissividades superiores a  $0,1 \text{ m}^2/\text{dia}$ ; b) transmissividades superiores a  $1 \text{ m}^2/\text{dia}$ ; c) transmissividades superiores a  $3 \text{ m}^2/\text{dia}$ ; d) transmissividades superiores a  $10 \text{ m}^2/\text{dia}$ .



## 7. CONCLUSÕES

Os trabalhos desenvolvidos com a presente Tese permitiram estabelecer uma metodologia em que se cruzam propriedades intrínsecas do maciço, passíveis de modelação estocástica a 3D, com propriedades hidrogeológicas do meio, medidas *in situ*, e avaliadas por via determinista.

Deste cruzamento resultam matrizes de informação aptas para modelos de escoamento, que reflectem a variabilidade e heterogeneidade local do tipo de maciço estudado e que, portanto, condicionam, de modo, por vezes incerto, a evolução tridimensional espacial dos escoamentos.

Foram, assim, gerados por simulação, campos 3D de transmissividade do maciço em que se traduzem com adequado nível de confiança as heterogeneidades que se verificam no meio rochoso em estudo, o que constituía o aspecto fulcral a explorar.

Com o desenvolvimento do Programa de Doutoramento foi possível:

- Seleccionar propriedades do maciço rochoso que comumente são obtidas em campanhas de caracterização *in situ* e que se revelam necessárias e determinantes ao subsequente desenvolvimento, com razoáveis níveis de fiabilidade, de modelos de escoamento;
- Integrar nos modelos as heterogeneidades resultantes de mudanças, por vezes, bruscas, no estado de alteração do maciço e nas litologias ocorrentes, ou as que são induzidas por alterações nos padrões de fracturação e que irão influenciar a propagação dos escoamentos;
- Construir e integrar nos modelos matemáticos de escoamento redes de fracturação geradas por processos estocásticos com exploração da hipótese de condicionamento dos escoamentos processados às famílias de fracturas que, neste contexto, se revelem ser as mais determinantes;
- Simular matrizes de determinadas propriedades dos maciços que sejam necessárias utilizar como *inputs* nos modelos geomatemáticos, explorando-se a possibilidade de cruzamento de tais matrizes entre si e com dados experimentais de transmissividade;
- Estabelecer correlações entre parâmetros hidrogeológicos obtidos deterministicamente, tais como valores de porosidade e transmissividade calculados a partir de ensaios *in situ* e propriedades intrínsecas e estruturais do maciço, cujas matrizes possam ser geradas por recurso a técnicas de modelação geomatemática a 3D.
- Experimentar o modo como as diferentes imagens simuladas ou estimadas podem ser consideradas na construção e calibragem dos modelos de transmissividade.

Estabeleceu-se uma metodologia específica, com aspectos inovadores na área da experimentação geomatemática e computacional, que possibilitará, a jusante, a construção de modelos de escoamento com representação, segundo níveis de confiança suficientemente aceitáveis, da heterogeneidade espacial de propriedades intrínsecas e estruturais do maciço, seja por geração de meios contínuos equivalentes (modelos de porosidades e transmissividades múltiplas), seja por técnicas de aproximação a meios contínuos com integração de redes de fracturação (aplicação de técnicas híbridas).

A metodologia desenvolvida permitiu que o valor de transmissividade de cada célula que constitui os modelos 3D seja simulado com condicionamento aos valores experimentais dos ensaios de bombagem, ponderados de acordo com as probabilidades dessa mesma célula representar certa *Litologia*, sob um determinado *Grau de Alteração* e, quando aplicável, com certo *Número de Fracturas* não preenchidas.

Este é um aspecto muito relevante, uma vez que foi possível gerar 300 imagens equiprováveis da transmissividade as quais que reflectem, a 3D, em todas as localizações do espaço, as heterogeneidades que caracterizam o meio em causa, heterogeneidades estas previamente medidas de acordo com variáveis consideradas determinantes no comportamento hidráulico do maciço e que são a *Litologia*, a *Alteração* e *Densidade de Fracturação*.

O condicionamento da *Densidade de Fracturação* aos histogramas da *Alteração* e, indirectamente, da *Litologia* e da *Profundidade*, encontra-se patente nas imagens simuladas. Este aspecto verificou-se muito relevante para a fase subsequente, de conversão dos modelos 3D de Fracturação em modelos 3D de Transmissividade, uma vez que, conforme se constata da análise de ensaios de bombagem nos furos e piezómetros, existe uma relação bem demarcada entre os resultados de *Transmissividade*, o tipo de *Litologia* e o *Grau de alteração*.

Os resultados de simulação da Transmissividade mostram que os escoamentos verificar-se-ão entre pequenos volumes preferenciais que terão entre si, e apenas, em alguns casos específicos, ligações muito restritas, dadas especialmente pela presença de certas litologias e estruturas específicas como filões de quartzo esmagado e/ou bastante fracturado ou brechas graníticas, e/ou dadas por uma matriz rochosa que localmente apresente altos índices de fracturação. Estas fracturas, muito provavelmente, encontram-se pouco preenchidas, e terão, necessariamente, de apresentar um significativo grau de conectividade entre si para que possam apresentar maior capacidade de escoamento.

A fracturação e estruturas de maior dimensão que apresentam orientação sub-vertical, características da região em que se insere a área de estudo, deverão desempenhar um papel importante em todo o dinamismo existente na região e, inclusivamente, na possibilidades do escoamentos poderem ser perpetuados até maiores profundidades.

O maciço estudado é bastante heterogéneo, composto por *bolsadas*, por vezes, ligadas entre si por *canais* de dimensão e localização restrita que possibilitarão a perpetuação de escoamentos de um modo demarcadamente irregular e de forma tortuosa. Em termos espaciais, este funcionamento hidrogeológico muito específico encontra-se bem patente nos mapas binários e visualizações tridimensionais produzidos a partir modelos 3D simulados da Transmissividade.

Note-se que a melhor visualização das imagens de transmissividade simuladas consegue-se recorrendo a escala logarítmica o que se coaduna com os resultados obtidos da interpretação dos ensaios de bombagem, igualmente representados sob este tipo de escalas quando comparamos valores característicos de diferentes litologias e condições de fracturação e que podem variar desde mínimos na ordem dos 0,01 m<sup>2</sup>/dia a máximos, extremos, na ordem dos de 400 a 500 m<sup>2</sup>/dia.

Aspectos relevantes da heterogeneidade deste meio como os efeitos de barreira que podem ser induzidos no meio, em virtude da existência de áreas fortemente alteradas, com efeitos de sericitização e argilização do maciço, ou efeitos de maior perpetuação de escoamentos, localizados, devidos à existência de brechas, filões mais fracturados, áreas do maciço intensamente fracturadas, ou litologias mais permeáveis (como é o caso dos micaxistos e das fácies de transição - migmatitos) encontram-se, assim, expressos nos modelos e são repercutidos nas malhas de transmissividade que constituem informação condicional fundamental para a construção dos modelos hidrogeológicos 3D.





## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, A, Soares, A e Reynaud, R (1993) Modelling the shape in Several Marble Types in a Quarry, Proc. of XXIV APCOM, J. Elbrond, X. Tang, Eds., 3, 452-459.
- Almeida, JA e Barbosa, S (2008) 3D Stochastic Simulation of Fracture Networks Conditioned Both to Field Observations and a Linear Fracture Density. Proceedings of the Eighth International Geostatistics Congress. Santiago, Chile, vol. I, 8 p.
- Almeida JA. (2010) Stochastic simulation methods for characterization of lithoclasses in carbonate reservoirs. *Earth Science Reviews*, 101(3–4): 250–70.
- Baecher, GB, Lanney, NA e Einstein, HH (1977) Statistical description of rock properties and sampling. Pp. 5C1–5C8 in Proceedings, 18th United States Symposium on Rock Mechanics, Colorado School of Mines. Golden, Colo.: Johnson Publishing Co.
- Billings, MP (1972) Structural Geology. 3rd Edition. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 606 p.
- Cameron, J (1959) Structure and origin of some uranium-Bearing veins in Portugal. Junta de Energia Nuclear. Memória nº 22. Lisboa.
- Carvalho, J, Ramalho, EC e Barbosa, S (2005) Using geophysical methods to identify alteration zones in the Prado Velho abandoned uranium mining site, Portugal. 67th European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE) Conference and Exhibition, Madrid-Extended Abstracts, 3227-3230.
- Carvalho, J, Ramalho, EC e Barbosa, S (2005) Using geophysical methods to identify alteration zones in an abandoned mining site. *Journal of the Balkan Society*, vol.8, Suppl. 1, 459-463, ISSN-1302-1672.
- Carvalho, L, Ramalho, E e Barbosa, SVT (2005) Using geophysical methods to identify alteration zones in the Prado Velho abandoned uranium mining site, Portugal. 4th Congress of the Balkan Geophysical Society. Bucarest, Roménia.
- Caumon G, Collon-Drouaillet P, Le Carlier de Veslud C, Viseur S & Sausse J (2009) Surface-Based 3D Modeling of Geological Structures. *Mathematical Geosciences* 41(Teaching Aids): 927–945.
- Cerveira, A (1951) Sobre a metalogenia do urânio em Portugal. *Boletim da sociedade Geológica de Portugal*. Vol. VIII – Fasc. III.
- Chambel, A (2006) Edit., AIH-GP International Association of Hydrogeologists - Portuguese Chapter and IAH - Commission on Hard Rock Hydrogeology - Iberian Regional Working Group. Proceedings of the 2nd Workshop of the IAH Iberian Regional Working Group on Hard Rock Hydrogeology, Évora, Portugal, 247 p.
- Chavez-Kus, L e Salamuni, E (2008) Determinação do parâmetro de intersecção de fraturas para o Aquífero Atuba. *Revista Brasileira de Geociências*. Arquivo digital 455-466.
- Chesnaux, R, Allen, DM e Jenni, S (2009) Regional fracture network permeability using outcrop scale measurements. *Engineering Geology Journal*, Springer-Verlag Ed., 108, 259-271.
- Chilès, JP, Guérin, F e Billaux, D (1992) 3D stochastic simulation of fracture network and flow at Stripa conditioned on observed fractures and calibrated on measured flow rates. In: J.R. Tillerson and W.R. Wawersik, Editors, *Rock Mechanics*, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 533–542.
- Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow, U.S. National Committee for Rock Mechanics, Geotechnical Board, Board on Energy and Environmental Systems, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council (1996). Technical Report, Rock

Fractures And Fluid Flow - Contemporary Understanding and Applications. National Academy Press, Washington, D.C., 551 p.

Cotelo-Neiva, JM (1995). Jazigos Portugueses de Minérios de Urânio. Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico. Memória nº4, Universidade do Porto.

Cotelo-Neiva, JM (2003a). Jazigos portugueses de urânio e sua génese. A geologia de engenharia e os recursos geológicos. Coimbra 2003. Imprensa da Universidade.

Cotelo-Neiva, JM (2003b). Jazigos Portugueses de Minérios de Urânio e sua génese. IV Congresso Ibérico de Geoquímica. XIII Semana da Geoquímica. Universidade de Coimbra.

Custodio, E e Llamas, MR (1983a) Hidrologia Subterranea. Tomo I. Ediciones Omega, S. A., Barcelona, 1157 p.

Custodio, E e Llamas, MR (1983b) Hidrologia Subterranea. Tomo II. Ediciones Omega, S. A., Barcelona 2350 p.

EXMIN (2001) Estudo director de áreas dos minérios radioactivos. 1ª Fase. Excerto do Vol. 2 – Área Mineira da Cunha Baixa e Quinta do Bispo. 25p.

EXMIN (2003) Fichas-tipo do Estudo-Base para a reabilitação de áreas mineiras degradadas. Ficha de Minas Abandonadas – Quinta do Bispo.

EXMIN (2005) Estudo director de áreas dos minérios radioactivos. 2ª Fase. Excerto do Vol. 2 – Área Mineira da Cunha Baixa e Quinta do Bispo. 25p.

EDM (2007) Caracterizações e projectos nas minas dos radioactivos – 1.ª Fase. Relatório final de candidatura QCA III e anexos técnicos VI e VII, Volume 5.3. Lisboa. 67 p.

EDM (2008) Projectos de execução e estudos de impacte ambiental das áreas mineiras de Cunha Baixa e Quinta do Bispo. Relatório final de candidatura QCA III e anexos técnicos. Lisboa. 17 p.

Fernandes Almeida, MAC (1994) Geoquímica, petrogénese e potencialidades metalogenéticas dos granitos peraluminosos de duas micas do Complexo de Cabeceiras de Basto. Tese para candidatura ao grau de Doutor em Geologia pela Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Porto. 305 p.

Fernandez-Turiel, JL, Saavedra, J, Vaquer, R, Duran, ME e Querol, X (1991) Late and postmagmatic alterations in the tin-bearing batholith of Ricobayo (Iberian Massif, NW Spain). Acta Geologica Hispanica, v. 26 (1991), 17-22.

Ferreira, MPV (1971) Jazigos uraníferos portugueses. Jazigos de Au-Ag-sulfuretos do Norte de Portugal. Livro-Guia da Excursão n.º5. I Congresso hispano-Luso-Americano de Geologia Económica. Direcção-Geral de Minas e Serviços Geológicos. Lisboa. 81 p.

Fialho, A, Chambel, A e Almeida, C (1998) Caracterização Hidráulica de Aquíferos Fracturados por Modelos de Porosidade Dupla no Concelho de Évora. Actas do 4.º Congresso da Água, 12 p.

Froidevaux R (1993), Probability Field Simulation, in A. Soares (ed), Geostatistics Troia'92, Kluwer Academic Pub., Dordrecht, 1, 73-84.

Gomes, CF (1988). Argilas – O que são e para que servem. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa. 457 p.

Grossman, N. (1988) Estudo das discontinuidades e sua influência no comportamento das rochas e maciços rochosos. As discontinuidades nos maciços rochosos. Características geométricas e influência na deformabilidade dos maciços. LNEC, Lisboa: 118 p.

Handy, M. R. (1989) Deformation regimes and the rheological evolution of fault zones in the lithosphere: The effects of pressure, temperature, grain size and time. Tectonophysics, Vol 163, 119-152.

Journel, AG (1994) Modeling uncertainty: some conceptual thoughts. Geostatistics for the Next Century. Ed. Dimitrakopoulos, Kluwer: Academic Pub.

- J.E.N. (1968) A Província uranífera do Centro de Portugal. Suas características estruturais, tectónicas e metalogenéticas. Junta de Energia Nuclear. Lisboa.
- Lin, DHF e Lipták, BG (2000) Groundwater and Surface Water Pollution, Lewis Publishers, 150 p.
- Lin, L, Jia, H e Xu, Y (2007) Fracture network characteristics of a deep borehole in the Table Mountain Group (TMG), South Africa. Hydrogeology Journal, Springer-Verlag Ed., DOI 10.1007/s10040-007-0184-y, 15p.
- Lukes, J (2005) Methods of well logging used for borehole correlation in the granite stock, Podlesí granite, Bohemian Massif. Czech Geological Survey. Bulletin of Geosciences, Vol. 80, 2, 155–161.
- Marques, JM, Chambel, A e Ribeiro, L. (2007) AIH-GP International Association of Hydrogeologists - Portuguese Chapter and IAH - Commission on Hard Rock Hydrogeology - Iberian Regional Working Group. Proceedings of the Symposium on Thermal and Mineral Waters in Hard Rock Terrains, Lisboa, Portugal, 202 p.
- Matos-Dias, JM e Soares de Andrade, AA (1970) Portuguese uranium deposits. Memórias e Notícias, Publicações do Museu e Laboratório de Mineralogia. Universidade de Coimbra, 22 p.
- Matos-Dias, JM e Costa, CVB (1972) A região uranífera da Cunha Baixa-Quinta do Bispo. Memórias e Notícias, Publicações do Museu e Laboratório de Mineralogia. Universidade de Coimbra, 24 p.
- Matos-Dias, JM e Machado da Costa, JM (1980) Aspectos geológico-mineiros dos jazigos uraníferos em exploração pela Empresa Nacional de Urânio. Publicações Serv. Geológicos de Portugal. Lisboa. 167-175.
- Martins, JA (1959). Hematitização e alteração ferruginosos no granito das Beiras; sua relação com as ocorrências de urânio. Junta de Energia Nuclear. Memória nº 16. Lisboa.
- Matias, F (2010) Modelação 3D de um Subsector das Mineralizações Auríferas de Casas Novas, Montemor-o-Novo, Tese de mestrado, FCT-UNL, 121p.
- Moench, AF (1984) Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. Water Resource Research, 7, 831-846.
- Nunes R e Almeida JA (2010) Parallelization of sequential Gaussian, indicator and direct simulation algorithms. Computers & Geosciences vol 36, pp. 1042-1052.
- Oda, M (1985) Permeability tensor for discontinuous rock masses. Géotechnique, 35, n.º 4, 483-495.
- Paradela, PL e Zbyszewski, G (1971) Hidrogeologia geral do Centro e Sul de Portugal. Livro-Guia da Excursão n.º 9. I Congresso hispano-Luso-Americano de Geologia Económica. Direcção-Geral de Minas e Serviços Geológicos. Lisboa. 123 p.
- Pereira, AJSC, Neves, LJPF, Dias, JMM e Barbosa, SVT (2005) Environmental hazards at Urgeiriça and Cunha Baixa-Quinta do Bispo old uranium mines. International Atomic Energy Agency, Proceedings Series 400, Environmental contamination from uranium production facilities and their remediation, 181-191.
- Pereira, AJSC, Neves, LJPF, Dias, JMM e Barbosa, SVT (2004) Evaluation of radionuclide contamination in the vicinity of the Cunha Baixa and Quinta do Bispo old uranium mines (Central Portugal). Radioprotecção, revista da Sociedade Portuguesa de Protecção Contra Radiações, Vol. II, n.ºs 4 e 5, 103-117.
- Pereira, MR e Almeida, C (1997) Interpretação de ensaios de caudal de aquíferos fracturados em Trás-os-Montes Oriental (Portugal) por modelos de porosidade dupla e por métodos clássicos. Hydrogeology of Hard Rocks, Some experiences from Iberian Peninsula and Bohemian Massif, Ed. By J. G. Yélamos & F. Villaroya, Madrid, 15-29.
- Quental, P, Almeida, JA & Simões, M (2012) Construction of high-resolution stochastic geological models and optimal upscaling to a simplified layer-type hydrogeological model. Advances in Water Resources (39), 18-32.

Ragan, DM (1973) Structural Geology. An Introduction to Geometrical Techniques. 2<sup>nd</sup> Edition. John Wiley & Sons, Inc., New York. 208 p.

Ranalli, G. (1995) Rheology of the Earth, 2.<sup>nd</sup> Edition. Chapman & Hall, London, 403 p.

Röhrich, T., 2005. AquiferTest v. 4.0 User's Manual – Advanced Pumping Test & Slug Test Analysis Software.

Roxo S (2011) Integração de informação secundária na modelação geoestatística da qualidade de solos em locais potencialmente contaminados. Aplicação à área subjacente de uma antiga refinaria., Tese de mestrado. FCT-UNL, 64p.

Soares, A., 1992. Geostatistical estimation of multi-phase structures. Mathematical Geology 24 (2), 149–160.

Soares, A e Brusco, A. (1997) Simulation of naturally fractured reservoirs, In E.Y. Baafi and N.A. Schofield, editors, Geostatistics Wollongong'96, Kluwer Academic Pub., Dordrecht, 1, 433-442.

Soares, A (2001), Direct Sequential Simulation and Cosimulation. Mathematical Geology, 33(8), 911–926.

Soares, A. (2006) Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente. IST Press, Lisboa, Portugal. 214 p.

Srivastava M (1992) Reservoir Characterization with Probability Field Simulation, SPE Paper, N. 24753.

Srivastava, M (2005) Probabilistic Modeling of Ore Lens Geometry: An alternative to Deterministic Wireframes. Mathematical Geology, 37 (5).

Telles, IA (2006) Desenvolvimento de um sistema integrado para modelagem de fluxo e transporte em meios porosos e fracturados. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 164 p.